

The Function of the Numerical Hydraulic Modeling in the Case of the Determination of the Environmental Status of Transboundary Groundwater Bodies

SÁNDOR PETHŐ¹, VIKTOR ÁCS¹, KÁROLY GONDÁR¹, KATALIN GONDÁR-SÓREGI¹,
ÉVA KUN¹, JAROMIR SVASTA², GYÖRGY TÓTH³

¹Smaragd-GSH Environmental Services Ltd., H-1114 Budapest, Villányi út 9.

²State Geological Institute of Dionyz Stur, 81704 Bratislava, Mlynská dolina 1., Slovak Republic

³Geological Institute of Hungary, H-1143 Budapest, Stefánia út 14.

Keywords: Hungarian–Slovak, transboundary, subsurface water body, regional-scale, numerical hydraulic model, hydrostratigraphy, water-balance, hydraulic potential, surface-subsurface water contact, UTM

Abstract

The bases of the water management plans prepared according to the EU directives, could be formed by numerical hydraulic models. It is necessary that the concrete model must concern to the whole regional water catchment area, since the territory examined could be put into a complex hydrogeological system in this way and adequate answers can be got for the questions related to it. In the framework of the Huskua 0502/166 Interreg IIIa Neighbourhood Programme (Enwat Project) the Smaragd-GSH Ltd. as a partner of the Geological Institute of Hungary (MÁFI) prepared the steady-state hydraulic models of three transboundary subsurface water bodies, which are situated on the area of Ipoly/Ipel' Valley, Aggtelek–Slovak Karst and Bodrog Basin.

Introduction

The Water Framework Directive (WFD) of EU was come into law in 22th December 2002 (European Parliament and Council 2002). The Directive meant the enactment such a uniform water protection politics which helps the realization of the transboundary coordinated water management in the frame of drainage basins. According to the WFD while a hydrogeological unit is examined it is practical to apply system-principled approach. This method needs the mathematical expresses of the relations between the different sub-systems and in this way the examination of the surface and subsurface water resources could be laid to quantitative bases.

By the system-principled approach the bases of the water management plans prepared according to the EU Directives could be formed numerical hydraulic models. The concrete model have to concern to the whole territory of the regional drainage basin which contains the research area. In this case the examined sub-region could be placed in

a complex hydrogeological system and we can get adequate answers for the questions related to it.

In the frame of the Huskua 0502/166 Interreg IIIa Neighbourhood Project (Enwat Project) the Smaragd-GSH Ltd. as a partner of the Geological Institute of Hungary (MÁFI) created the numerical hydraulic model of three transboundary water bodies and their surroundings. The location of the modeling areas shows *Figure 1*. The Ipoly/Ipel' and the Bodrog regions are built up by porous-fissured rocks. The models of the groundwater systems of these territories were made by Visual Modflow 4.2 software (Waterloo Hydrogeologic Inc. 2006) which is based on finite difference method. While the model concerns to the Aggtelek–Slovak Karst was created by Feflow 5.0 software (Wasy GmbH 2003) which is based on finite element method. The aim of the hydraulic modeling was that the models supply frames for the evaluation of the quantity and quality status of subsurface water bodies examined during the Enwat Project and in this way help the preparation of the

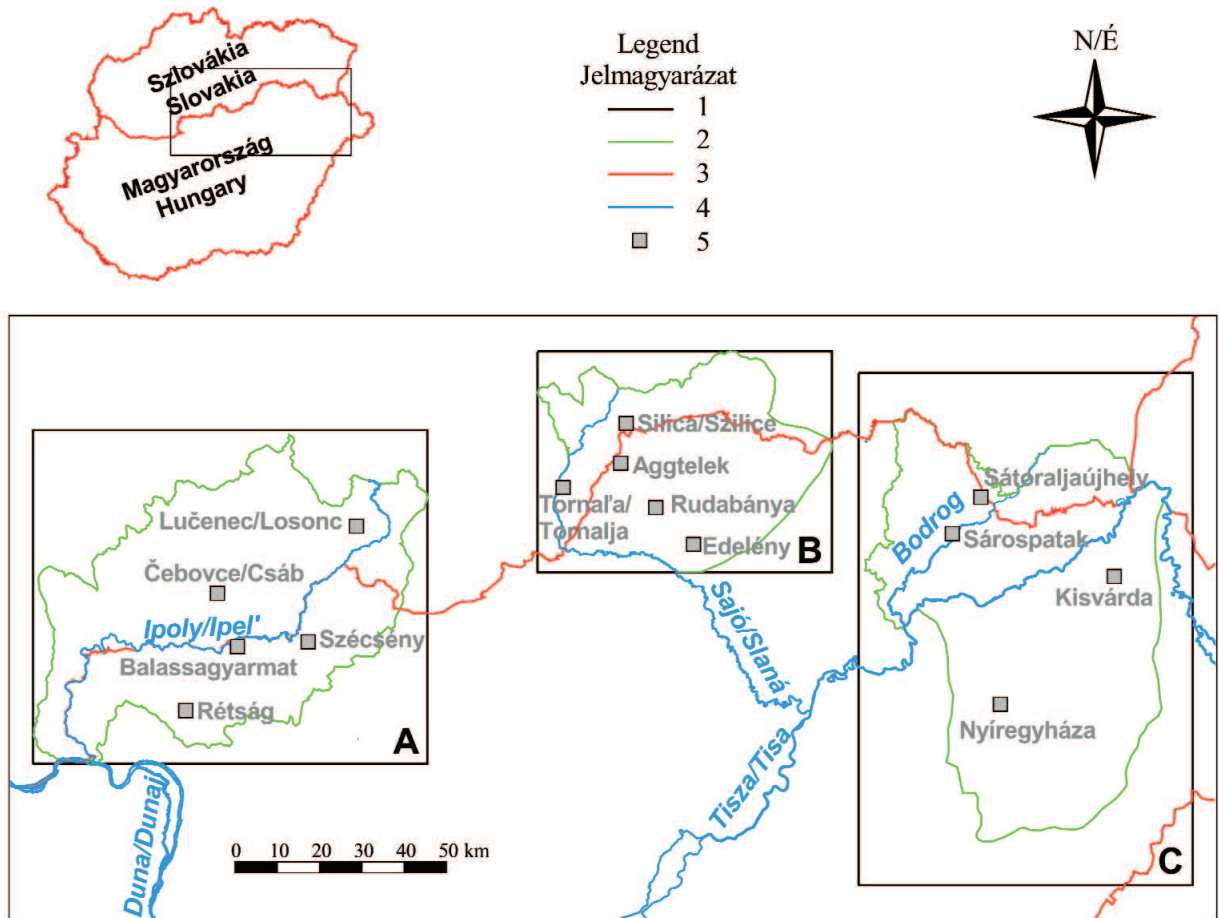


Figure 1. The locations of the model areas

1 – state border, 2 – model frame, 3 – model boundary, 4 – stream, 5 – settlement. A – Ipoly/Ipeľ Valley and its catchments modeling area, B – Aggtelek-Slovak Karst modeling area, C – Bodrog Basin and its catchments modeling area

1. ábra. A modellezett területek elhelyezkedése

1 – országhatár, 2 – modellkeret, 3 – modellhatár, 4 – vízfolyás, 5 – település. A – Ipoly-völgy és vízgyűjtője modellterület, B – Aggteleki-és Szlovák-karszt modellterület, C – Bodrog-medence és vízgyűjtője modellterület

water management plans concern to them. Additionally the modeling also suitable for forecast not only for present status determination.

Process of Model-preparation

The transboundary project areas needed the application of the common coordinate system instead of the national systems. In the model-preparation phase for the harmonization of the geological-hydrogeological data and the additional data (topography (Figure 2), hydrography, topo-elements) Universal Transverse Mercator (UTM) coordinate-system was used which is suitable for Mid-Eastern European application. On the bases of the data prepared different type of maps were created in digital format. The different types of maps are: basic topo-element map, digital terrain model map, slope-category map, precipitation map, infiltration map, evapotranspiration map, map of water production and calibration objects.

The technical peculiarity of the hydraulic models is that

it necessary to determine parametric field to a partial volume of underground space where the precise data are not known. Hence the most complicated preparation task of the modeling work is the delineation of the geological structures of the research areas in 3D and the execution of simplifications needed as the regional scale models. Vertically the main hydrostratigraphic units and within them laterally the different hydrostratigraphic categories with the same permeability were determined for accomplish the modeling work. These hydrostratigraphic units, and categories were delineated on surface type and data-distribution maps. In the case-studies the values of the hydraulic conductivity parameters related to each unit were determined according to the database improved in similar projects in MÁFI. The variation of the parameters in an individual unit was taken into consideration only in the case of the Aggtelek-Slovak Karst which has sophisticated geological structure.

This task was followed by the models set-up, the run of the models and the calibration of them. The first steps in the set-up phase were the determination of the 3D geometry and the parametric field of the models. Hence there is no option

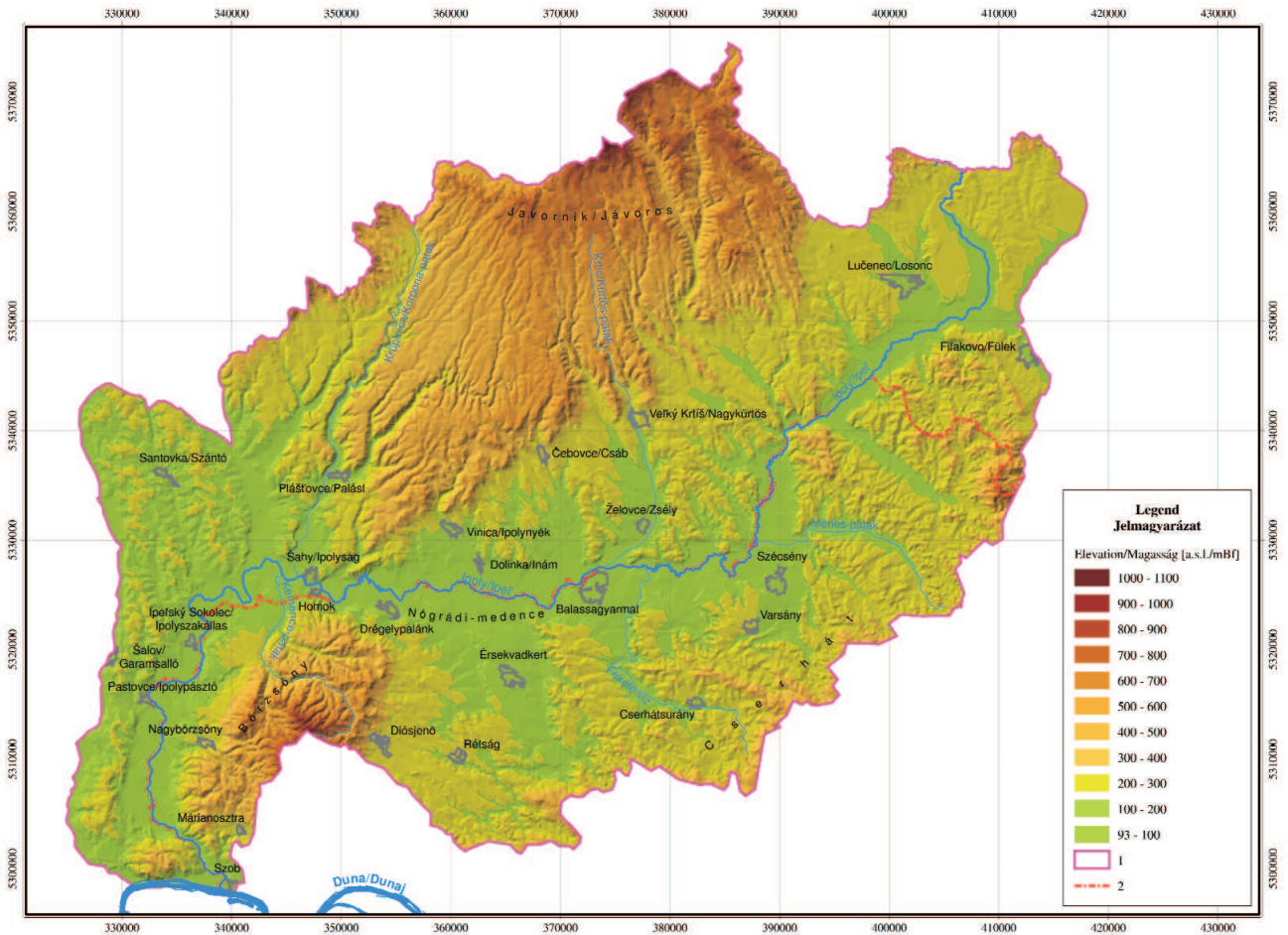


Figure 2. Map of digital terrain model, Ipoly/Ipel' Valley and its catchments model area (UTM coordinate system)
1 – state border, 2 – model boundary

2. ábra. Digitális domborzatmodell-térkép, Ipoly-völgy és vízgyűjtője modellterület (UTM koordinátarendszer)
1 – országhatár, 2 – modellhatár

for thinning out the beds in the case of each applied modeling software, technically we determined the layers representing the thick basement sediments with very thin continuous parts above the basement outcrops. With this method and alternating the parameters in the layers we were able to determine the near surface weathered zone of the basement rocks. In the case of thinning out in deeper position we derived the lateral variability of the concerned continuous modeling layer with parameter alteration as well.

The next inputs were the boundary conditions (infiltration, rivers, discharge elements), the water abstractions and the calibration points.

At the final phase the numerical hydraulic models of the research areas were finished by 'trial and error' iterative manual calibration method. During the calibration process the values of the hydraulic conductivity, recharge, and the river-drain boundary conditions were changed. The differences of the measured and calculated heads related to the reference points were approved with higher tolerance in the case of Ipoly/Ipel' valley and Aggtelek–Slovak Karst model, because of them higher relief and the more complicated geological setting. Higher differences were occurred in higher

topographic altitude, where the local variety (i. e. suspended water level) could be delineated with a rough approach in the case of a regional model. The relationship between the sophisticated DTM and the groundwater surface was handled by the river-drain and recharge boundary conditions. The groundwater surface intersected the topographic surface only in some cases, when there was any of the following hydrogeological reasons: in points in cases of springs which were not determined as constant heads; along lines in the bottom of deep base levels; and wetland areas.

In the followings the model preparation and the modeling phases, additionally the research results achieved are introduced by research areas.

Hydraulic Model Prepared for the Ipoly/Ipel' Valley and its Catchments Area

Description of the Modeling Area

The Ipoly/Ipel' Valley model area consists of the Ipoly/Ipel' watershed and the related waterbodies. Table 1

contains the corner points of the model area in UTM coordinate system.

The model area is divided by the Hungarian – Slovakian border. The Hungarian side of the area consists of the Börzsöny Mts, Nógrád Basin, northern Cserhát, and Karancs geographic regions besides the Ipoly/Ipel' Valley. Slovakian part of the area consists of the south–southwestern slopes of the Štiavnické vrchy (Selmecí-hegység), southern slopes of Javorina (Jávoros-hegység), and the northwestern part of the

Table 1. The corner stones of the Ipoly/Ipel' valley model area in UTM coordinates

	UTM X	UTM Y
minimum	324 800	5 297 650
maximum	418 050	5 370 540

Slovenské Rudohorie (Szlovák-érchegység) on the north. On the south, it consists of the gradually dipping slopes of the foothills and foothills toward the Ipoly/Ipel' and the area of Korpona Forest. The relief of the marginal mountainous terrain is variable; however it is significant compare to the broad valley bottoms of Ipoly/Ipel'.

The extent of the model area is the whole Ipoly/Ipel' watershed. On the north, dense radial water-network formed on the palaeovolcanic area of Northern Carpathians, Štiavnické vrchy, and Javorina. Due to the regional dipping of the area the direction of the rivers is north to south.

The lower part of the Ipoly/Ipel' is 80 km long, and it feeds the Danube. The catchments area examined is poor in still waters. Numerous small springs (1–10 l/min) arise from the layers dipping toward the small basins. These layers have low storage capacity that is why the yield of the springs is low. Seasonally these springs have high yield (100 to 800 l/min), but occasionally they run dry.

Annual precipitation is between 600 and 620 mm on the lowland areas. In the area of lower Ipoly/Ipel' Valley the precipitation is 580 to 600 mm per year. The precipitation increasing effect of the relief is obvious; the central part of the Börzsöny has 800 mm/year precipitation, while the Karancs the precipitation is 650 mm/year. The Medvesvidék area has the largest variability in the annual precipitation (610 to 670 mm/year). The Nógrád Basin has higher precipitation than the average as well; it is 630 to 670 mm/year. In this area, 55 to 60 % of the annual precipitation falls during the summer months (MTA 1990).

To determine the geological structure of the model area the studies of BALOGH (1991), BÁLDI (1983), FÜLÖP (1994) and HAAS (1996) were considered. Reports of the Hungarian Geological Institute (MÁFI, 2005) and ŠGÚDŠ (State Geological Institute of Dionyz Stur, 1985) were also noted.

The Ipoly/Ipel' model area has the most complicated geological structure out of the three model areas. The basement formations are covered by thick Tertiary sediments in most part of the model area and are revealed only by boreholes. The eldest formations are Palaeozoic mica schists,

gneisses, amphibolites and intermediate meta-volcanic rocks that form part of the Veporic Unit of the Western Carpathians in the northern segment of the model area. In the northeastern part meta-volcanic and acidic volcaniclastic rocks, meta-carbonates and locally metamorphic rocks compose the formations of the basement. South the Diósjenő Line the basement consists of younger, Upper Triassic Dachstein Limestone. The Palaeozoic formations can be regarded as aquitards and can be considered as the lower boundary of the model area while the Upper Triassic limestone (that consists the southern part of the basement) stores thermal water. Transmit of the water from the deep (≈1000 m) basement limestone to the aquifer in shallow depths is negligible thus the modelled aquifer can be regarded as a separate system; its surface is the upper boundary of the model.

Most of the formations that cover the basement rocks are aquitard Oligocene clays and clayey silts. Miocene sands and sandstones that cover the Oligocene clays in the foreground of Badenian volcanic rocks in the Slovakian part are denuded in the biggest part of Hungary. Thus south the Ipoly/Ipel' Oligocene formations are mostly covered by Quaternary beds.

Outcrops of Badenian volcanic rocks are the characteristic of the Slovakian part, where the palaeo-stratovolcano of Jávoros occupies almost the whole western part of the Slovakian model area. In the Hungarian part palaeovolcanic andesites of Börzsöny and Cserhát represent Badenian formations. Andesite formations store fissure water that outcrops in many low-yield springs. Presence of small separated sub-surface catchment basins are common, that makes determination and quantification of uniform potential level complicated.

Quaternary alluvial beds of Ipoly/Ipel' play an outstanding role both in aspect of water management and the hydrogeological modeling of the Ipoly/Ipel' water body that is divided by Hungarian and Slovakian frontier. The alluvial beds consist mostly of volcanic rock pebbles with subordinate amount of quartz pebble. Although due to their diverse genetics leakage-hydraulic parameters of alluvial beds may show great variety, in general they can be set down as formations of good-excellent hydraulic conductivity. Water supply in the Hungarian part of Ipoly/Ipel' Valley is based on these alluvial beds.

The Set-up of the Model

Considering the hydrogeological environment of the research area finite-difference software (Visual Modflow 4.2. (Waterloo Hydrogeologic Inc. 2006) was applied for modeling. Because of the large extent of the model area, the regional characteristic of the model, and the possibilities of the applied software 250 times 250 metres grid were used.

The geological formations exist on the research area were assembled into four hydrostratigraphic model groups, based on simplifying techniques.

- Layer 1: Quaternary porous aquifers;
- Layer 2: Badenian volcanites: fissured aquifers;
- Layer 3: Oligocene and Miocene formations: clayey sands, sandstones, porous aquifers;
- Layer 4: pre-Tertiary basement: practically it is impermeable.

Table 2 contains the hydrostratigraphic units and their lateral and vertical specific conductivity values.

The border of the modeled area and the surface of the pre-Neogene basement is no-flow boundary, this way the studied basin is one independent system.

Infiltration rate was calculated from the precipitation and geology of the area. The diverse surface geological formations of the region are divided into the following 15 categories based on their hydrostratigraphic characters: clay, clayey loess, clayey marl, sand, sandstone, karst, gravel, loess sand, limestone, marl, fissured sandstone, fissured metamorphic rock, fissured volcanite, tuffs (more detailed classification than directly used in the model). Based on these 15 categories the surface hydrostratigraphic units which affect were determined (Figure 3), and precipitation rates were allocated (Table 3.). The database was compiled

Table 2. Hydrostratigraphic units and their hydraulic conductivities (K [m/s])

Formations	K_v (lateral) [m/s]	K_v (vertical) [m/s]
Fissured vulcanite	$1,00 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-5}$
Loess	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$
Sand	$5,00 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-5}$
Clay	$1,00 \times 10^{-8}$	$1,00 \times 10^{-8}$
Aleurite	$1,00 \times 10^{-7}$	$1,00 \times 10^{-7}$
Clayey marl	$5,00 \times 10^{-6}$	$1,00 \times 10^{-7}$

on the bases of the data applied by MAFI in similar regional projects.

There are 23 years long (1980–2002) time series of 32 precipitation gauge in the model area. Based on the time series, average annual sum precipitation were calculated, then precipitation distribution map was created.

With the help of the overlain precipitation distribution and surface geological maps the infiltration zones were determined Figure 4. The infiltration depending on the geology is between 21 to 85 mm/year.

The surface streams, except of the Danube, are river type elements in the model, this way infiltration through river bed

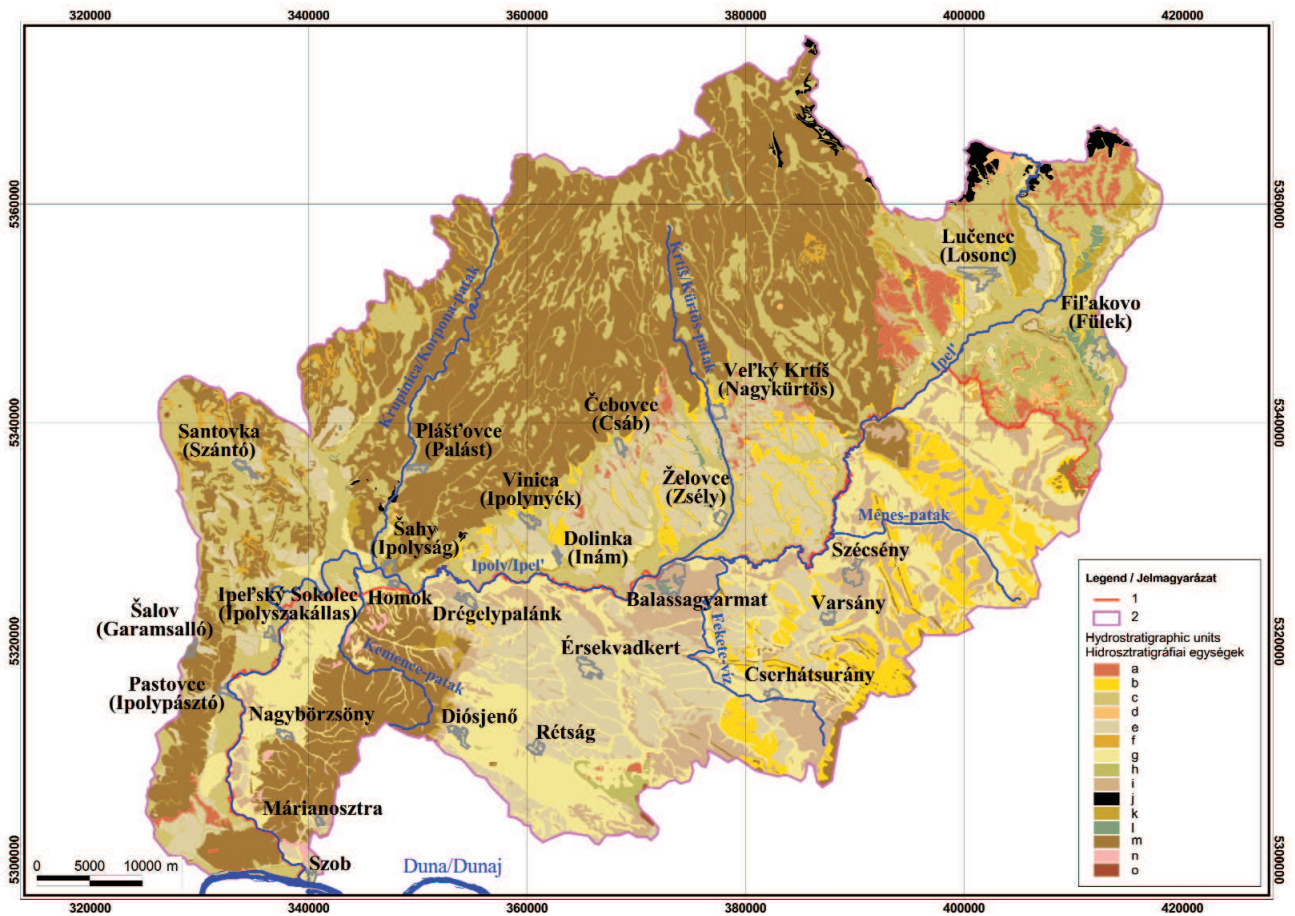


Figure 3. The hydrostratigraphic units of the uppermost model layer, Ipoly/Ipeľ Valley and its catchments model area (UTM coordinate system) 1 – state border, 2 – model boundary, hydrostratigraphic units: a – clay, b – silt, c – clayey marl, d – marl, e – loess, f – tuff, g – loess sand, h – fissured sandstone, i – sand, j – fissured metamorphite, k – sandy gravel, l – gravel, m – fissured volcanics, n – limestone, o – karst

3. ábra. Legfelső modellréteg hidrosztratógráfiai egységei, Ipoly-völgy és vízgyűjtője modellterület (UTM koordináta-rendszer)

- 1 – országhatár, 2 – modellhatár, hidrosztratógráfiai egységek: a – agyag, b – aleurit, c – agyagmárga, d – márga, e – lösz, f – tufa, g – löszös homok, h – repedezett homokkő, i – homok, j – repedezett metamorfitt, k – homokos kavics, l – kavics, m – repedezett vulkanit, n – mészkő, o – karszt

Table 3. Characteristic infiltration rate of the geological formations in %

Formation	Symbol of formation	Infiltration (%)
Clay	A	3.7
Clayey loess	AL	4.3
Clayey marl	AMG	5.0
Sand	H	10.8
Sandstone	HK	12.5
Karst	K	33.3
Gravel	KAV	13.3
Loess	L	6.0
Loessal sand	LH	7.5
Limestone	M	18.3
Marl	MG	5.3
Fissured sandstone	RH	10.0
Fissured metamorphic rocks	RM	11.7
Fissured vulcanite	RV	13.3
Tuffs	T	6.3

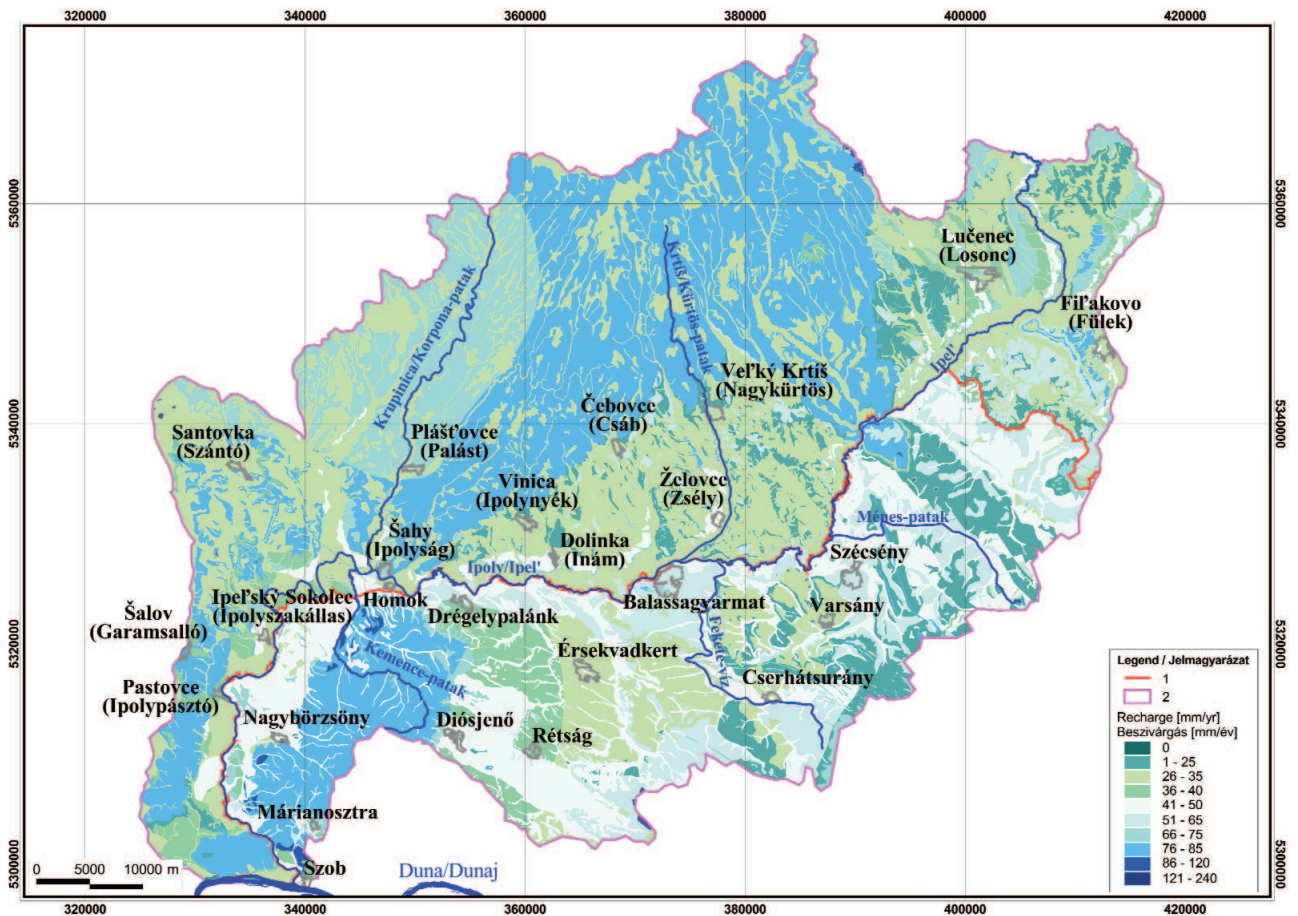
and shallow groundwater inflow to the rivers were taken into consideration. The southern border of the model area, the Danube was determined as constant head cell.

Water levels of the rivers were bound to the topographic

elevations, as the rivers run on the surface or slightly cut into the surface. As the depth of the cut into is not known in the whole model area, so the presumed water level of the streams is one metre below the topographic elevation at that point.

The levels of the river beds were taken 0.8 metre uniformly in the case of streams, and 1.0 to 1.5 metres at the case of Ipoly/Ipel' depending on its elevation, the upper part of the river the smaller value was used. The direction of shallow groundwater flow is depends on the river bed level (gaining or losing stream). River conductance is given as 100 m²/day in the case of streams; and 150 m²/day, in the case of Ipoly/Ipel'. This seemingly high value means a relative low value in the model, because of the large cellsize (low resolution). This one value represents the width of the river and the thickness and conductance of the colmated river bed together.

Further input parameters for the model are the location and amount of water abstraction. There are 325 production objects with a yield more than 1000 m³/y on the model area. The significant water works on the Hungarian side of the model area are the water works of Dejtár, Perőcsény–Tésa, Szécsény, and Vámosmikola.

**Figure 4.** Recharge distribution derived from the precipitation, Ipoly/Ipel' Valley and its catchments model area (UTM coordinate system)

1 – state border, 2 – model boundary

4. ábra. Csapadék eredetű beszivárgás-eloszlás, Ipoly-völgy és vízgyűjtője modellterületen (UTM koordináta-rendszer)

1 – országhatár, 2 – modellhatár

Running the Model

SSOR algorithm was used to solve the equation system, and to speed up the iteration, the accuracy was given as 0.5 metres. Better precision was not required, because of the scale of the model is regional. The model was run under steady state conditions, time variations were not studied with the model, so it was presumed that all considered parameter is characteristic mean value in time.

Calibration

Calibration of the model was based on the water level of monitoring wells. Other water level monitoring points were used in model calibration also, for example the height of springs, and river gauge data, so there were 292 calibration points on the model area. The calculated and modeled water level was compared in great interval, between 90 m and 500 m aBsl (above Baltic Sea level) as water level monitoring data was observed not only on the alluvial fan of Ipoly/Ipel' but on the higher elevated areas of Slovakia and Hungary. Altogether 292 calibration points were used.

Calculated and measured values show agreement; the largest difference is at the high elevated areas of Börzsöny. On the lower elevated areas of the modeled region, on the strict neighbourhood of Ipoly/Ipel' (between 90 to 280 m aBsl) the difference between the measured and calculated values is less than 10 metres. The relative high difference between measured and modeled values is acceptable considering the rough cell design (low resolution), the size of the area and the big differences in the elevation.

Our goal was to model the alluvial valley of Ipoly/Ipel' as one waterbody unit. Possible that the small springs at higher elevation mark local flow systems, locally infiltrating water and perhaps this is the reason for the differences between the calculated and measured values.

Assessment of the Flow Field and Water Balance Based on the Results of the Model

As a result of the numerical model, there were two parameters for the description of waterbodies, the calculated head distribution and the water budget of the model area.

The flow direction is determined by the distribution of hydraulic head. Hydraulic potential pattern of the uppermost layer, derived from the difference of elevation, follows the surface as a consequence in the area of Börzsöny and Javorina the calculated water level is high. The hydraulic head values are the lowest at the area of Ipoly/Ipel' Valley (Figure 5).

Elevation of the calculated values (asl) and the spatial distribution of the head indicates that the main discharge area is the Valley of Ipoly/Ipel'. The main area of water withdrawal is the Hungarian Dejtár bend, which is recharged from the elevated surfaces of Slovakia and Hungary.

Water budget calculated in the model (Table 4) could be given only for elements of hydrological process within the modeled area in m³/day, due to the given boundary conditions.

Table 4. Calculated water budget

	Amount of inflow [m ³ /d]	Amount of outflow [m ³ /d]
Infiltration	591 200	0
Evapotranspiration	-	15 026
Water abstraction by wells	-	43 388
River bed water budget	268 430	721 180
Duna (constant hydraulic head)	-	81 306
Total	859 630	860 900
Difference (input-output)	-1270	
Difference [%]	~0	

The calculated and measured values show great agreement in the model area. The difference between the total input-output in the water budget is negligible ($\approx 0\%$) considering the indicated volume of water. The volume of water abstracted by production wells in the past few decades could be compensated by the recharge function of the different element of the water budget (infiltration from the surface, from stream beds).

Storage is greatly variable due to the river recharge. We draw the attention to the fact, that the amount of outflow is determined by the Danube as southern boundary, which is the surface discharge of the Ipoly/Ipel' alluvial basin as well as it discharges subsurface water.

Results of Hydrological Model

Based on the detailed study of hydrogeological environment of the watershed, and on the subsurface water flow depicted by the permanent numerical hydraulic model the followings can be stated:

— the hydrogeological units of the studied porous-fractured aquifer system is in sensitive connection with each other;

— in the valley type watershed basin, gravitation driven steady state subsurface flow systems — intermediate, regional — formed;

— the main recharge areas are the mountains surrounding the Ipoly/Ipel' Basin, where the effectively infiltrating precipitation feeds the local subsurface flows, then it moves toward the center region of the basin as part of the regional and intermedier flow system;

— the regional discharge area is the Ipoly/Ipel' region, the discharge is dual: the surface type is going through the intensive evapotranspiration, while the line type is the subsurface discharge of Ipoly/Ipel';

— the lower section of the Ipoly/Ipel' Valley is in close contact with the Danube hydraulically, so water leaving the Ipoly/Ipel' alluvial fan is controlled by water level in the Danube;

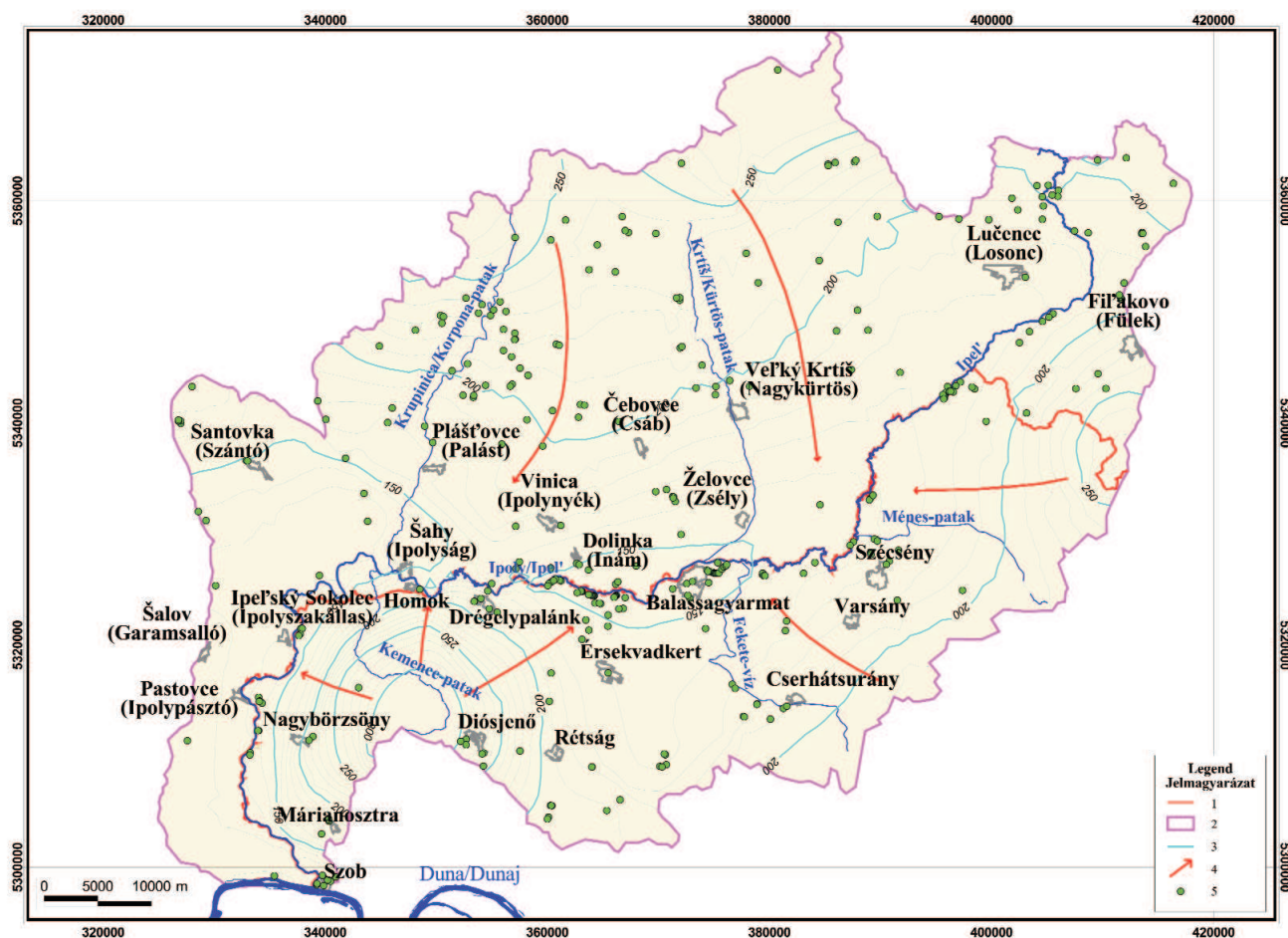


Figure 5. Calculated hydraulic potential distribution in the uppermost model-layer and the representative directions of groundwater flow, Ipoly/Ipel' Valley and its catchments model area (UTM coordinate system)

1 – state border, 2 – model boundary, 3 – calculated potential level [aBs], 4 – main direction of groundwater flow, 5 – production well

5. ábra. A legfelső modellrétegre számított hidraulikuspotenciál-eloszlás és a jellemző felszín alatti vízáramlási irányok az Ipoly-völgy és vízgyűjtője modelletterületen (UTM koordináta-rendszer)

1 – országhatár, 2 – modellhatár, 3 – számított vízszint [m Bf], 4 – felszín alatti víz fő áramlási iránya

— the Ipoly/Ipel' Valley area due to its central position in the drainage basin has a good water recharge in its natural state.

Hydraulic Model Prepared for the Aggtelek–Slovak Karst area

Description of the Area

Table 5 contains the corner stones of Aggtelek–Slovak Karst model area in UTM coordinate system.

The model area belongs to two main units both geographically and tectonically. Majority of the area is part of the Hungarian, Slovakian Gömör–Torna Karst, the rest is the Szendrő (Cserehát) Hills. In respect of the project the transboundary waterbody of Aggtelek–Slovak Karst has significant role as the upper (surface) part of the Gömör–Torna Karst.

Considering the covered deepkarst area — situated in deeper and deeper position to southwest direction — and the non-karstic units with worse transmissivity was important with the aim of studying regional groundwater flows. The boundary of both the study and modelled area is in west and south: the Sajó Valley, in the north: the range of Aggtelek–Slovak Karst, in the east: the border line of Palaeozoic range according to the limits of No. k.2.16.2 waterbody.

Main watercourses of the area are the Sajó, Bódva, Jósva and Rakaca. Watersheds of these rivers cover most of modelled area, while the southeast part belongs to the Hernád watershed.

Table 5. The corner stones of Aggtelek–Slovak Karst model area in UTM coordinates

	UTM X	UTM Y
minimum	444 100	5 342 900
maximum	513 700	5 395 130

The modifying effect of the relief is significant in the distribution of precipitation, in the higher hills the average annual precipitation is between 670 to 710 mm. Cserehát Hills is the driest, the precipitation is 600–640 mm in the east Cserehát, it is even less in the west Cserehát, 580–620 mm. 650 mm is the average on other hilly areas. On the east side of the Sajó Valley and on the southern part of the Hernád Valley the annual precipitation is less than 600 mm.

Determining the geological construction of the flow domain is based on works MÁFI (2005), ŠGÚDŠ (1985), FÜLÖP (1989, 1994), HAAS (1994) and LESS (2007).

As we mentioned above the formations of the model area belong to two main units both geologically and tectonically. While the Szendrő Hills (Cserehát) is part of Bükk tectonic unit, it has a southern Alpid–Dinarids type of Palaeozoic sequence, the Aggtelek–Slovak Karst and Rudabánya Mountains — were built up mainly Triassic rocks — are part of the Inner West Carpathians nappe system. The Rudabánya Mountains are inside of the Darnó Zone, dividing the Inner West Carpathians from the Bükk tectonic unit, as a consequence its geology and tectonics are quite complex.

Hydrogeologically, the most important formation of the area is the karst system of Triassic limestone sequences have great extent both horizontally and vertically. It can be found in uncovered situation on the Aggtelek–Slovak Karst or covered with oligocene–miocene sediments. The estimated depth of

the covered karst at the southeast at edge of the model area is –1200 aBsl. (Figure 6). Sandstone and claystone intercalations occur in that karstic beds which have uniformly high hydraulic conductivity. These intercalations regionally hardly deteriorate the average hydraulic conductivity, however locally these reducing effects can not be observed.

In the model area the most important recharge fields can be found on the land of Aggtelek–Slovak Karst, particularly on the highly karstified surface (karst plains: Pelsőc and Szilice Plateau, Felső-hegy and Alsó-hegy [Figures 7 and 8]), where through the dolines and sink holes the precipitation can infiltrate in concentrated way.

On the uncovered limestone areas, karst features like cave systems occur in several hundreds metres thickness, the most worthily famous cave system is the Domica–Baradla Cave System. There are active all year around wet caves or intermittent caves, active only after snow melt or heavy precipitation as well as non-active caverns, in the stage of collapsing-filling up, so their present hydrogeological role are varied. 712 various caves in different stage are known in the area of Aggtelek–Slovakian Karst.

The regional model has no response for giving detailed description the formations of the karstic phenomenon, the important task is to take account of the diffuse and fissure (cave) flow. Depending on the karst water level the cave system could be in the vadose zone, described with vertical

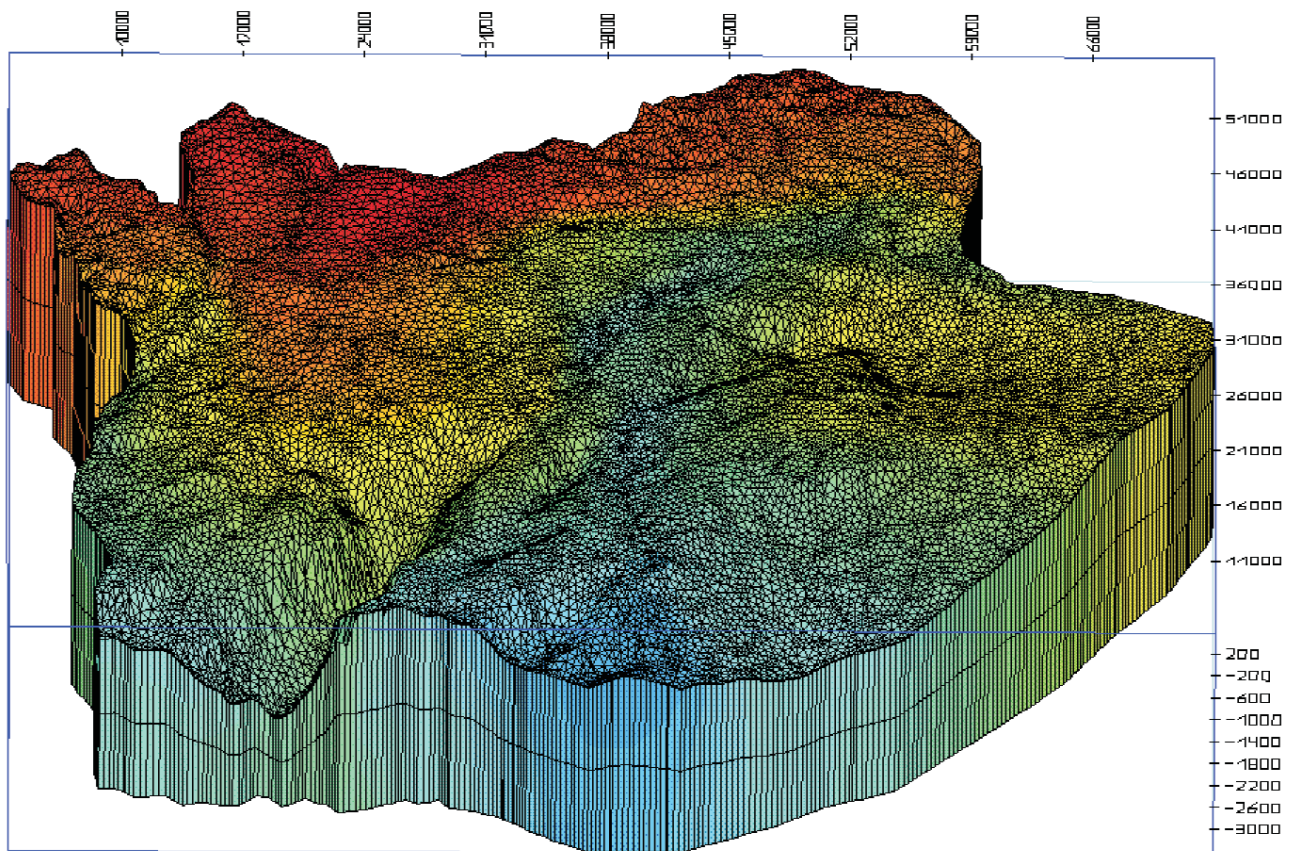


Figure 6. Topography of the Triassic formations - modeling figure, Aggtelek–Slovak Karst

6. ábra. Triász képződmények felszíne - modellábra, Aggteleki- és Szlovák-karszt

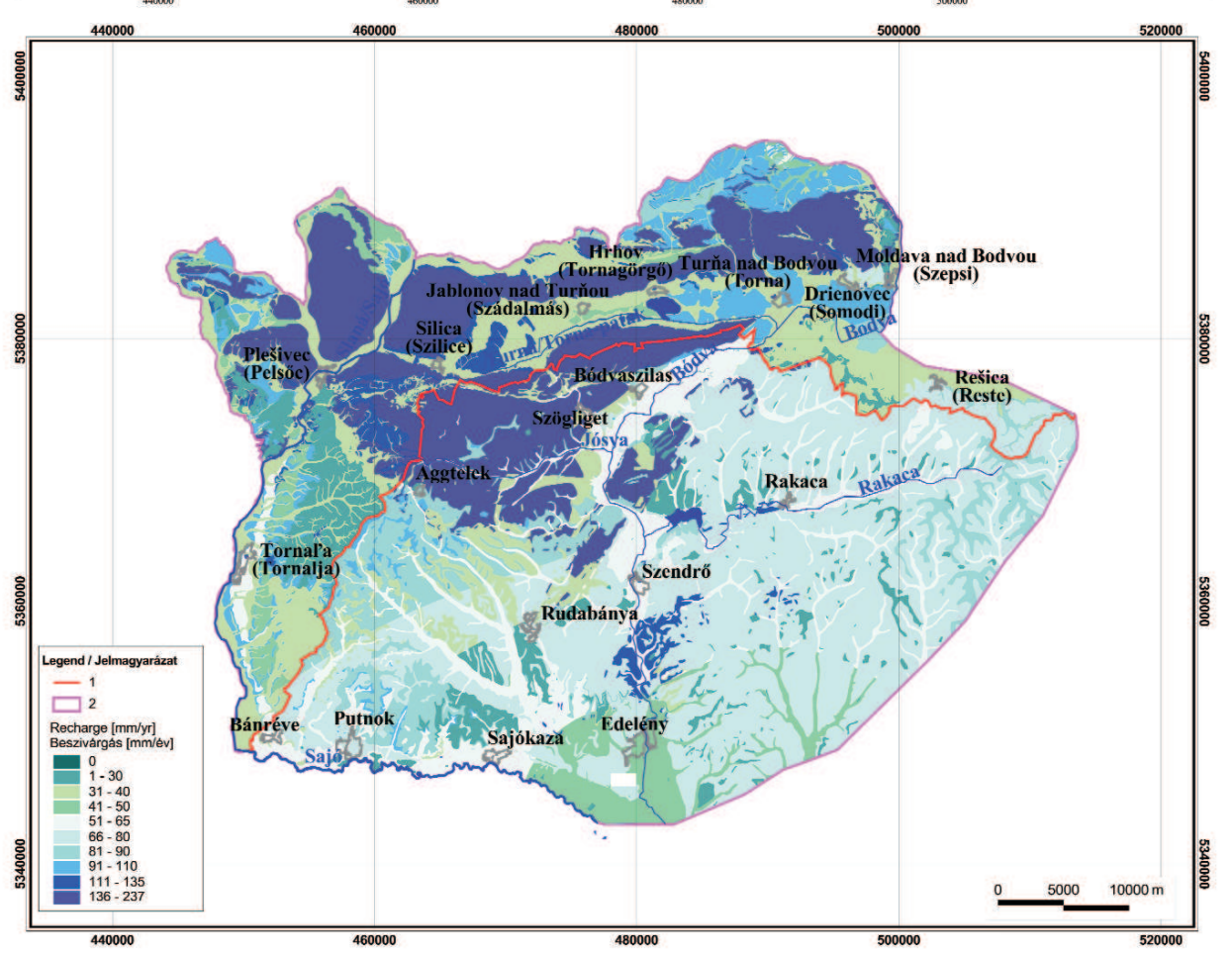
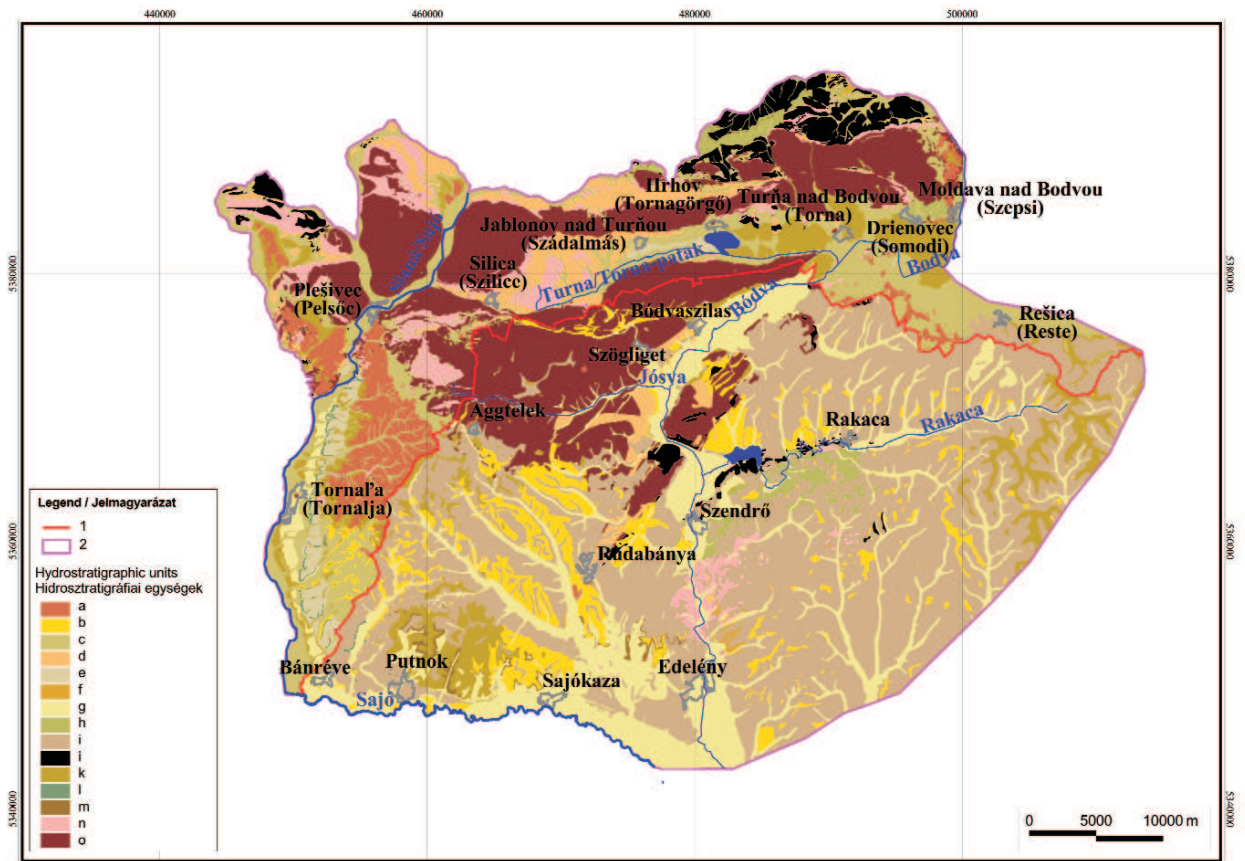


Figure 7. The hydrostratigraphic units of the uppermost model layer, Aggtelek-Slovak Karst model area (UTM coordinate system)

1 – state border, 2 – model boundary, hydrostratigraphic units: a – clay, b – silt, c – clayey marl, d – marl, e – loess, f – tuff, g – loessal sand, h – fissured sandstone, i – sand, j – fissured metamorphite, k – sandy gravel, l – gravel, m – fissured volcanics, n – limestone, o – karst

7. ábra. Legfelső modellréteg hidrosztratigráfiai egységei az Aggteleki- és Szlovák-karszt modellterületen (UTM koordinátarendszer)

1 – országhatár, 2 – modellhatár, hidrosztratigráfiai egységek: a – agyag, b – aleurit, c – agyagmárga, d – márga, e – lösz, f – tufa, g – löszös homok, h – repedezett homokkő, i – homok, j – repedezett metamorfit, k – homokos kavics, l – kavics, m – repedezett vulkanit, n – mészkő, o – karszt

water movement domination, or it could be under the water table in the freatic zone. In regional scale the finite-element method could take account of the geometry of cave-systems, but in practice the knowledge of their geometry quite poor. Therefore regionally we approach these fissured beds with equiv-porous formations. Naturally the zone of cave systems have the highest values of the hydraulic conductivity.

Description of the Model

The mesh generation is an important task of the finite element modeling. The horizontal mesh design is influenced by the boundary of the model, by the surface water network, by the tectonic elements, by the borders of geological units, and by the production and abstraction wells and springs. This model consists of 6 model layer, 148 940 finite elements and 91 530 nodes.

Vertical boundaries:

Upper boundary surface of the model is the real surface. This model lets to use the moving surface possibility, where the surface of the uppermost layer adjusted to the surface of saturated zone ensuring better run environment for the model.

Lower boundary of the model is the –3500 metre aBsl plane, determined by the minimum elevation of bedrock.

As the model does not allow the wedging of layers, therefore in those areas where the bedrock is on the surface new layers were introduced to ensure continuity of the covering layers. The following layers were differentiated:

Layer 1: Quaternary sequence,

Layer 2: Oligocene/Miocene sequences,

Layer 3: Karstified (weathered) part of Mesozoic (Palaeozoic),

Layer 4: Slightly or not karstified (weathered) surface of Mesozoic (Palaeozoic) strata,

Layer 5: Palaeozoic strata, substrata of model.

Infiltration rate of the hydrostratigraphic units were defined based on previous experience (database of MÁFI) and data from literature. For the first two model layer it was derived from the geological map. For the third model layer it was determined using the pre-Quaternary geological map. Because of the layer continuity, the lack of covering layers in the karst areas was solved with parameter changes; here the first two layers is more loose and karstified than the third layer. Table 6 consists the infiltration rates of the hydrogeological units.

On the karst and non-karst surface it is highly important to determine the parameters of water-courses. In this model they are defined with their nodes. Stream stages were derived from the digital terrain model, as the streams run close to the surface, just slightly cutting in. Inflow and outflow for 1 unit head difference was given as riverbed conductance. There was one constrain condition, that is only outflow was allowed on the stream nodes. The numerous springs in karst as well as in non-karst areas are defined as constant head nodes boundary condition. During the model run, the fact that the springs of recharge areas do not depict the level of saturated zone caused problems.

As we mentioned above the main centre of the recharge is the Aggtelek-Slovak Karst, where the the average infiltration rate is 33%. The whole area was taken account in respect of infiltration. On the simplified geological maps the following formations are shown:

clay (A), clayey loess (AL), clayey marl (AMG), sand (H), sandstone (HK), karst (K), gravel (KAV), loess (L), loessal sand (LH), limestone (M), marl (MG), fissured sandstone (RH), fissured metamorphic rocks (RM), fissured vol-

Table 6. Hydrostratigraphic units and their hydraulic conductivity (K [m/s])

Hydrostratigraphic units	K_{xy} (horizontal) [m/s]	K_z (vertical) [m/s]
Well karstified, fractured limestone	$4,48 \times 10^{-4} - 6,56 \times 10^{-4}$	$4,48 \times 10^{-4} - 6,56 \times 10^{-4}$
Loamy covering layers	$1,70 \times 10^{-6} - 8,00 \times 10^{-6}$	$1,70 \times 10^{-6} - 8,00 \times 10^{-6}$
Sandy, silty, loess top layers	$2,60 \times 10^{-5} - 9,80 \times 10^{-5}$	$2,60 \times 10^{-6} - 1,96 \times 10^{-5}$
Gravel covering layers	$3,10 \times 10^{-4} - 4,91 \times 10^{-4}$	$3,10 \times 10^{-4} - 4,91 \times 10^{-4}$
Slightly fissured, poorly karstified Triassic limestone at different depth	$1,74 \times 10^{-4} - 2,30 \times 10^{-4}$	$1,74 \times 10^{-4} - 2,30 \times 10^{-4}$
Non or hardly fissured limestone	$5,00 \times 10^{-7} - 5,00 \times 10^{-8}$	$5,00 \times 10^{-7} - 5,00 \times 10^{-8}$
Darnó Zone, crystalline bedrocks	$1,00 \times 10^{-8} - 5,00 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-8} - 5,00 \times 10^{-9}$

Figure 8. Recharge distribution derived from the precipitation, Aggtelek-Slovak Karst model area (UTM coordinate system)

1 – state border, 2 – model boundary

8. ábra. Csapadék eredetű beszivárgás-eloszlás az Aggteleki- és Szlovák-karszt modellterületen (UTM koordinátarendszer)

1 – országhatár, 2 – modellhatár

canite (RV), tuffs (T). Based on the infiltration rate of formations given in previous *Table 3*, and by overlying the geological map and precipitation distribution map, the map of precipitation value of formations was created.

The characteristic infiltration values are calculated from the percent values of formations multiplied by the average infiltration data at that location (24 meteorological stations, 23 years).

The infiltrating precipitation leaves the subsurface terrains as:

- natural springs on the surface,
- seepage feeding the alluvial flows in the valleys,
- subsurface seepage at boundary of basin sediments and mountains,
- artificial water abstraction.

On the area, yield of karst springs are highly depends on the supply; in a given area they maximize the karst water level. One part of the water abstraction is through karst springs, like Tohonya Spring (Aggtelek), Pásnyag Spring (Komjáti). The exact yield of these springs are unknown, we can only estimate them. The springs are defined as constant head nodes in the model; as a consequence their yields are used for calibration. In the permanent model can not handle with the extremity of spring's yield, only with an average values.

Average well yield in 2002 was used for the amount of abstraction in the model, where this data was not available average productions of earlier years were used.

Running the Model

The model runs at steady state flow, leaving the vadose zone out. Layers 1 to 3 are unconfined/confined, while layers below these are strictly confined. In our model karst water table is determined by the head of the third layer.

Calibration

During the running procedure all together average water levels of 84 observation wells were compared to the calculated head distribution. In case of 15 of 52 objects were the differences below 15 metres in measured and calculated values. This result satisfies the expected accuracy of permanent model.

In some cases in the hilly area, calculated water levels are lower than the level deduced from the elevation of springs. It is hard to determine the thickness of unsaturated zone of the recharge areas and continuous level of karst water. There are separated blocks, where karst water is isolated for example it creates karst water levels or separated karst water blocks.

Assessment of the Flow Field and Water Balance Based on the Results of the Model

There are two important output parameters of the numerical model that aid the description of waterbodies: the

calculated head distribution and the calculated water budget. Based on the calculated head map, the direction of the main flows are north to south, or it is northwest to southeast from the hills. (*Figure 9*) On the hilly areas, since the majority of vadose zone was left out, the relief effect disappears. In the model of Felső-hegy – Torna Basin – Alsó-hegy, the area is in a continuous flow field; however there are no measured data yet to prove it. On the forehills the water table follows the relief, the river valleys are the main discharge zones.

The total inflow of volume of the modelled domain is 783 663 m³/day, the total outflow is 783 749 m³/day; the

Table 7. Calculated water budget of the steady state model

Components of water budget	Volume of inflow [m ³ /day]	Volume of outflow [m ³ /day]
Infiltration	783 663	-
Withdrawals through wells	-	5 913
Fluxes through nodes of watercourses	-	606 712
Fluxes through nodes of springs	-	171 124
Total volume	783 663	783 749
Imbalance (input-output)		86
Volume rate of imbalance [%]		~0

imbalance is 86 m³/day, which is irrelevant rate comparing with the volume of in or outflow ($\approx 0\%$) (*Table 7*).

The value of infiltration is equal with the total inflow as at the nodes of watercourses inflow was not allowed. The volume of water withdrawal through wells is 5 913 m³/day. The volume rate through the nodes of rivers and constant head is 78–22%. The data clearly show that calculated water budget of whole model has only insignificant error, the volume of inflow and outflow is close to equilibrium, therefore the yields of the springs would significantly decline under the same incoming parameters with increased water withdrawal.

Summarizing the Results of the Hydrogeological Model

Based on the modeling procedure of Aggtelek–Slovak Karst the following statements were proved:

— The balance of karst-water system mainly depends on environmental factors above all the amount of precipitation. Therefore this system is highly sensitive to changes of climate.

— With mainly discharge of springs the water budget has natural equilibrium.

— In case of significant increasing of water withdrawal through wells or in the case of very dry weather can cause springs would run dry causing notable water shortage, and the extremely changing climate will enhance these problems.

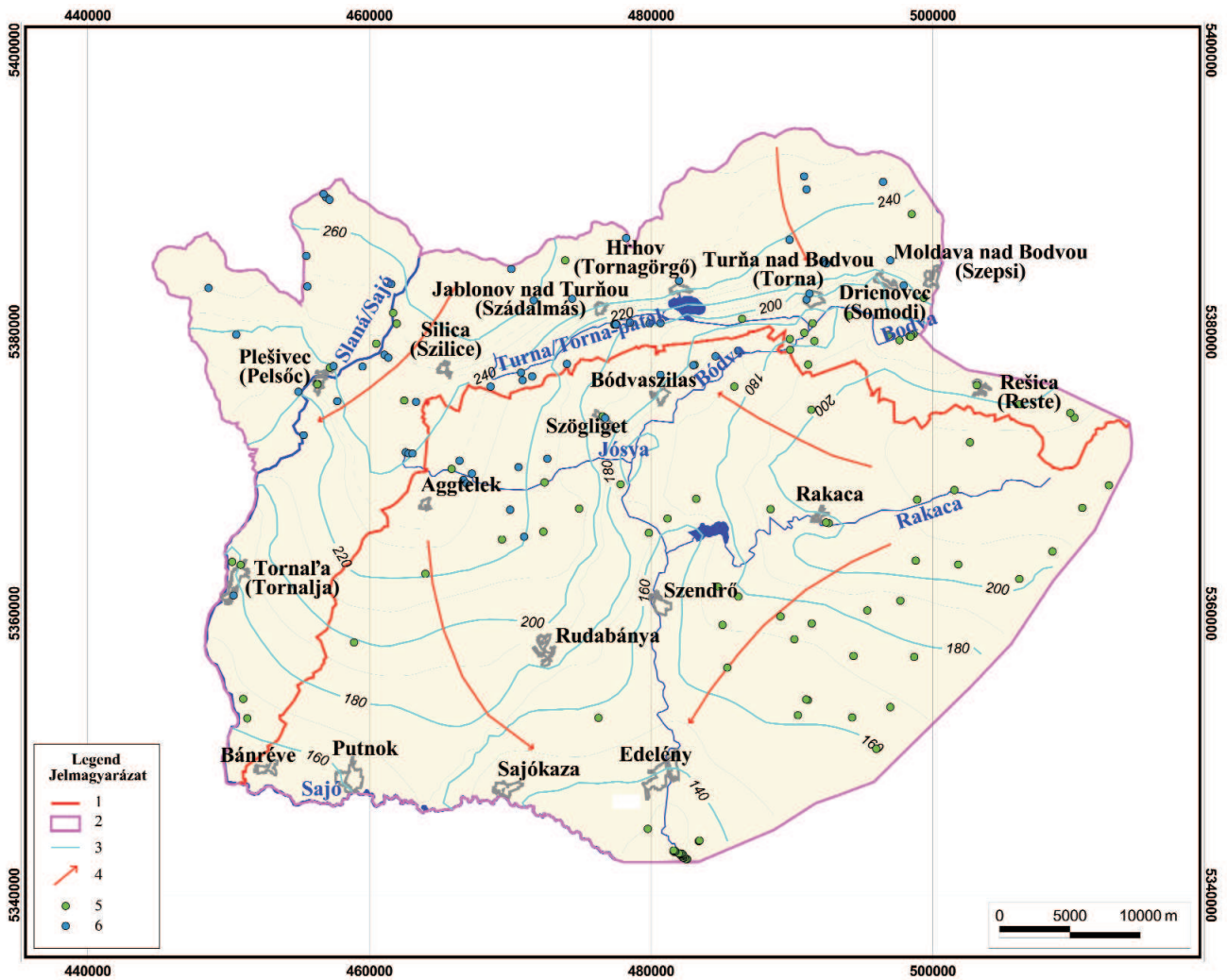


Figure 9. Calculated hydraulic potential distribution in the karstic model-layer and the representative directions of groundwater flow, Aggtelek-Slovak Karst model area (UTM coordinate system)

1 – state border, 2 – model boundary, 3 – calculated potential level [aBs], 4 – main direction of groundwater flow, 5 – production well, 6 – spring

9. ábra. A karsztos modellrétegre számított hidraulikus potenciál-eloszlás és a jellemző felszín alatti vízáramlási irányok az Aggteleki-és Szlovák-karszt modellterületen (UTM koordináta-rendszer)

1 – országhatár, 2 – modellhatár, 3 – számított vízszint [m Bf], 4 – felszín alatti víz fő áramlási iránya

Hydraulic Model Prepared for the Bodrog Basin and its Catchments Area

Table 8 contains the corner points of the Bodrog Basin and its catchments area in UTM coordinate system.

The five deterministic subregions and their topography of the model area are from northwest to south as it is follows:

- 1 — Zemplén Mountains with great relief,
- 2, 3 — Bodrogtköz and Rétköz regions with low relief,
- 4, and 5 — the Nyírség and Hajdúság regions where the surface divided with sandy hills.

From the regional subsurface flow point of view the mountainous and the elevated sandy hill parts are regional recharge areas, while the basins are regional discharge areas.

There are no significant open water bodies, while the

major rivers are the Tisza, the Bodrog, the Latorca/Latorica, and the Bodrog on the model area.

The yearly sum precipitation increases toward north and east, and it is 520 to 600 mm per year. The Zemplén Mountains has more precipitation; the sum is 600 to 700 mm per year (MTA 1990).

On the bases of the work of the MÁFI (BOCZÁN et al. 1966, GYARMATI et al. 1976, TÓTH 1986, GYALOG 1996, MÁFI 2007a, 2007b) and the ŠGÚDŠ (1985) we give a brief overview of the complex geology of the area.

Table 8. The corner stones of the Bodrogtköz model area in UTM coordinates

	UTM X	UTM Y
minimum	520 000	5 269 000
maximum	599 000	5 390 000

The basement consists of different Proterozoic — Palaeozoic crystalline rocks. The Upper Miocene volcanic rocks of Tokaj Volcanic Formation erupted to the surface along more than 3000 metres long collapsed area. The mountains mostly built up of rhyolite, dacite and andesite lava and pyroclastic rocks. These rocks have low hydraulic conductivity that decreases from the weathered surface inward. The pyroclasts have lower permeability due to their clayey weathering and their less fractured structure; so they represent a separate hydrogeological unit close to the surface.

The Upper Badenian – Sarmatian volcanoes erupted through the crystalline bedrock and through Triassic carbonates at Bodrogszerdahely on the bases of borehole data. The study area has two stratified andesite volcanoes; one is at Bodrogszerdahely and one at Királyhelme. These volcanoes have low hydraulic conductivity similarly to the fractured volcanic rocks of Zemplén, furthermore their upper weathered zones are separated as a layer with a higher hydraulic conductivity as well.

The volcanic rocks reaching under the basement are covered by Badenian–Pannonian sediments, while the volcanic rocks are covered by mostly Sarmatian–Pannonian deposits. The sediments series is more than 1000 metres thick, and contains the impermeable surface considered the border between Lower and Upper Pannonian sequences.

The Upper Pannonian sediment sequence in overall built up of medium to low permeability layers, where the rate and thickness of coarse sediments decreases upward. Based on the above mentioned facts, the Upper Pannonian sequence is considered as one hydrostratigraphic unit, it has medium hydraulic conductivity horizontally and poor hydraulic conductivity vertically.

The thickness of Quaternary siliciclastic sediments, wedg-

ing out toward the mountainous areas, is 100 to 180 metres, and its grain size varies laterally and vertically. Based on the surface geological map of the area, the clastic formation of the upper 10 metres thick layer can be successfully delineated and hydrostratigraphically characterized. Permeability of each Quaternary formation is in the category of good, medium, poor.

There is no deterministic tectonic element either regional or subregional scale. The smaller, but hydrogeologically deterministic tectonic elements, like fissures in volcanite, were considered as diffusive factor in the regional model.

Description of the Model

Considering the size of the modeled area, the regional feature of the modeling task, and the possibilities of the applied Visual Modflow 4.2. (Waterloo Hydrogeologic Inc. 2006) software, 250 times 250 metres grid design was used.

In the model three hydrostratigraphic levels were differentiated vertically (Table 9). In the first shallow groundwater model layer (1. model layer), 9 hydrostratigraphic units were differentiated laterally (Figure 10). The number of the hydrostratigraphic units was modified to 11 due to the calibration process of the model when two more metamorphic rock types were distinguished with slightly different permeability in the Ronyva/Ronava Valley. Considering the model the vertically proportional grid design is technically favourable, so the second and third model layers, the Lower Quaternary and Upper Pannonian sequences, were divided to sublayers. This way 7 model layers were defined for the model, however hydraulic parameters of sublayers belonging to the same group were not modified, so the model has three hydrostratigraphic layers (Figure 11).

The borders of the model area and the base of the Upper Pannonian hydrostratigraphic unit are no flow boundaries,

Table 9. Hydrostratigraphic units and their hydraulic conductivities (K [m/s])

Model layer	Hydrostratigraphic units	Formation	K_x [m/s] (lateral)	K_z [m/s] (vertical)
1.	Quaternary sediments, weathered surface and close to surface crystalline, volcanic and pyroclastic rocks containing soilwater,	Clay	1E-8	1E-8
		Clayey silt	1E-7	1E-7
		Fine sand	9E-6	9E-6
		Sand	5E-5	5E-5
		Loess sand	5E-4	5E-4
		Limestone	1E-6	1E-6
		Fissured metamorphic rocks	5E-5	1E-5
		Fissured metamorphic rocks	3E-7	8E-7
		Fissured volcanite	1E-8	5E-8
		Tuffs	1E-8	5E-8
		Medium sized sand	1E-6	5E-7
2-3.	Lower part of Quaternary and Neogene volcanite	Quaternary sequence	5E-4	5E-6
		Neogene volcanite	8E-7	8E-8
4-7.	Upper Pannonian sequence and Neogene volcanite	Upper Pannonian sequence	7E-4	1E-6
		Neogene volcanite	5E-7	5E-8

Figure 10. The hydrostratigraphic units of the uppermost model layer, Bodrog Basin and and its catchments model area (UTM coordinate system)

1 – state border, 2 – model boundary, hydrostratigraphic units: a – clay, b – silt, c – loess, d – tuff, e – loessal sand, f – sand, g – fissured metamorphite, h – fissured volcanics, i – limestone

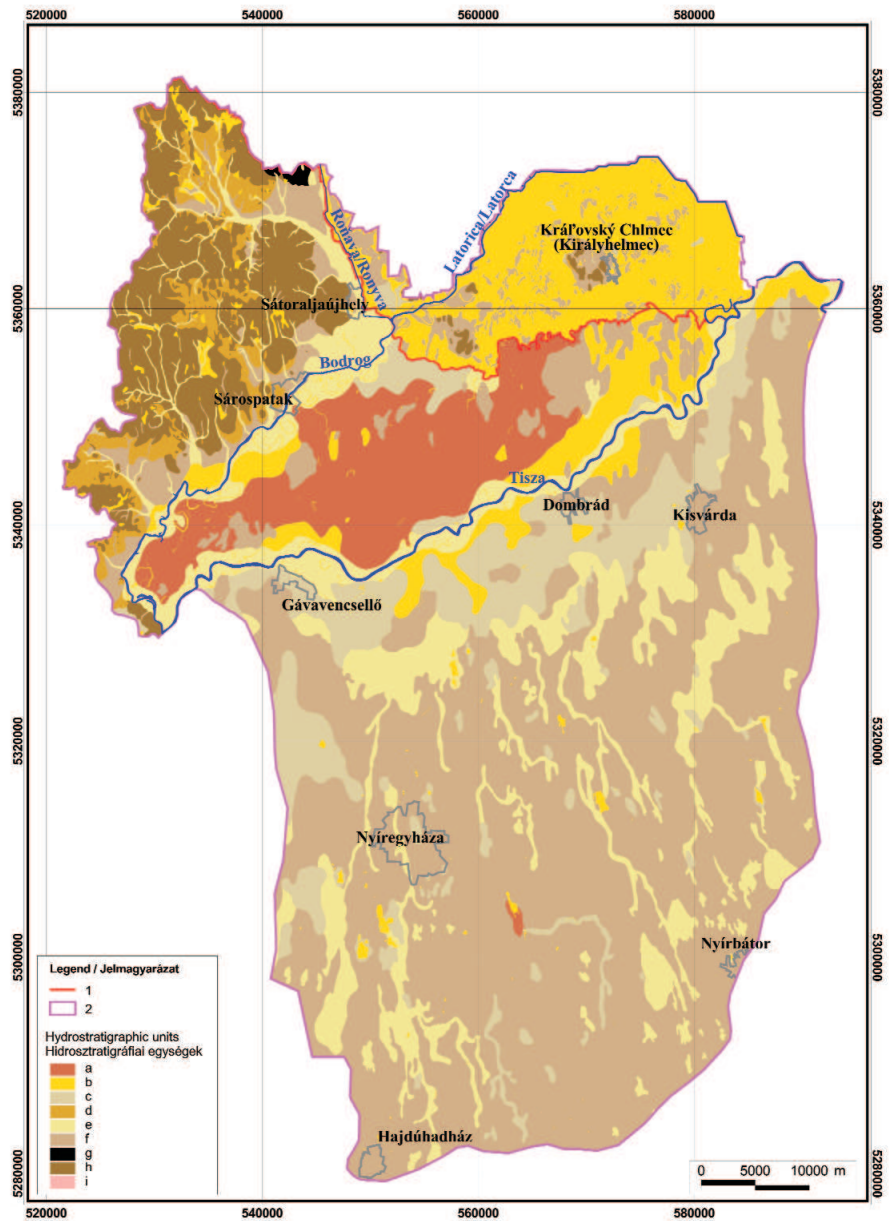
10. ábra. Legfelső modellréteg hidrosztratiográfiai egységei a Bodrog-medence és vízgyűjtője modellterületen (UTM koordinátarendszer)

1 – országhatár, 2 – modellhatár, hidrosztratiográfiai egységek: a – agyag, b – aleurit, c – lösz, d – tufa, e – löszös homok, f – homok, g – repedezett metamorfít, h – repedezett vulkanit, i – mészkő

this way the studied basin is a separate system in the modeling point of view.

In the model area the infiltration from the primary precipitation was calculated based on the distribution of precipitation and on the close to the surface geology. Characteristic potential primary infiltration percent were ordered to the surface formations in 9 groups: clay (A), clayey loess (AL), sand (H), loess (L), loessal sand (LH), limestone (M), fissured metamorphic rocks (RM), fissured volcanite (RV), tuffs (T) (Table 3).

In the model area 23 years long time series of 38 precipitation gauges (1980–2002) were available. Based on the time series, annual average precipitations were calculated, and then distribution maps were created. Then the simplified geological map



Ny/W

K/E

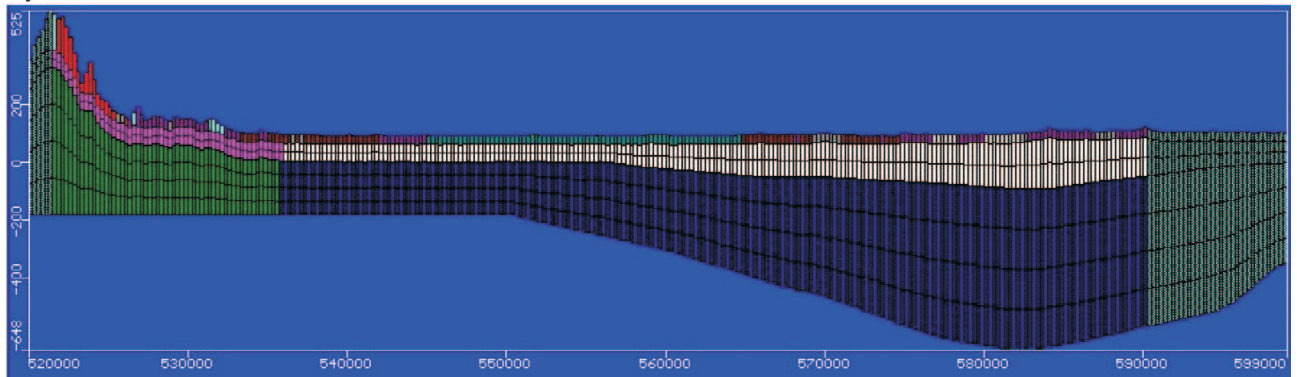


Figure 11. Significant W-E orientated hydrostratigraphic cross-section in the middle part of the modeling area – modeling figure, Bodrog Basin and and its catchments model area (UTM coordinate system and Baltic sea level) vertical exaggeration: 10×

11. ábra. Jellemző Ny-K-i irányú keresztmetsvény a modellterület középső részéről – modellábra (UTM koordinátarendszer, Balti-tenger szint feletti magasság) túlmagyatás: 10×

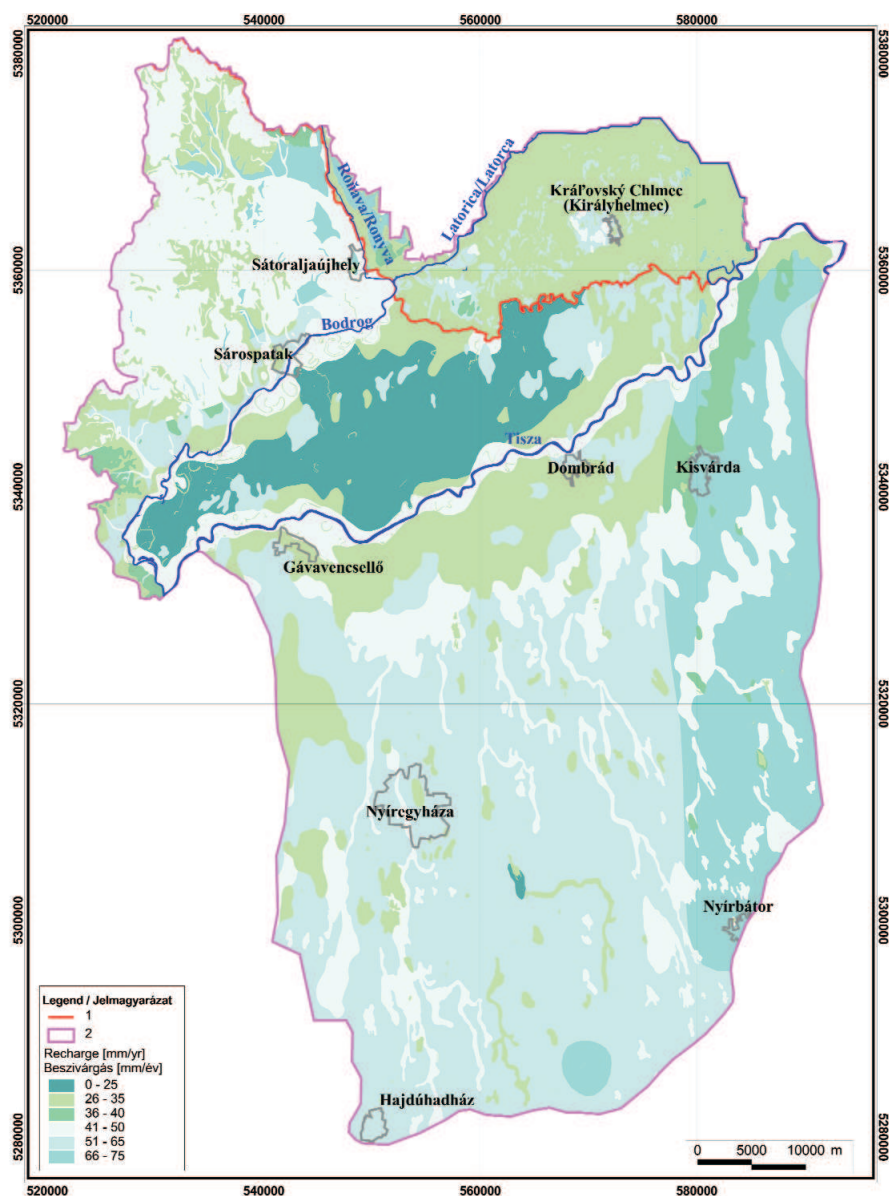


Figure 12. Recharge distribution derived from the precipitation, Bodrog Basin and its catchments model area (UTM coordinate system)

1 – state border, 2 – model boundary

12. ábra. Csapadék eredetű beszivárgás-eloszlás a Bodrog-medence és vízgyűjtője modellterületen (UTM koordinárendszer)

1 – országhatár, 2 – modellhatár

and the precipitation distribution map were overlaid to depict the primary infiltrations zones (Figure 12).

In the model to determine the effective infiltration three extensive units with the same evapotranspiration value were distinguished (Figure 13) based on the above mentioned over-

laid maps, on the climate characteristics and on the Shallow Groundwater Budget Map of Hungary (TÓTH 1986). The three areas are Zemplén Mountains, Ronyva/Ronava Valley – Bodrokköz – Rétköz, and Hajdúság – Nyírség. Table 10 contains the characteristic surface and near surface evapotranspiration, and the effective depth of evaporations values of the three area.

Areas characterized by the primary infiltration and the zones of evapotranspiration were overlaid in the model as model layer, so this way the areas with effective infiltration and the shallow groundwater water balance were determined.

Drain Boundary Condition

The model has drain type boundary on the northwestern part of the model area in the Zemplén Mts. The draining element is a seepage surface 0.1 metre below the surface, and the conductance determining the rate of discharge was given 50 m²/d.

River Type Boundary Conditions

4 significant (Tisza, Bodrog, Latorca/Latorica, Ronyva/Ronava) rivers were determined as river type boundary condition in the model area. Table 11 contains the water level data of the gauges used in the model (annual mean value of 2002). Water level data between the gauges were determined by using linear interpolation.

Hydraulic conductance of the riverbed (C) of Tisza, Bodrog, and Latorica was calculated by multi-

plying the width of the rivers (W) with their length in each cell (L) and with the vertical specific conductance value of their channel material (K_z), and by dividing with the thickness of channel material: $C = (W \times L \times K_z) / M$. The channel material conductance (C) of the Ronyva/Ronava was uni-

Table 10. Evapotranspiration zones determined in the model and their data

Recharge area	Evapotranspiration [mm/year]	Effective Depth [m]
Zemplén Mountains	20	1
Ronyva/Ronava valley – Bodrokköz – Rétköz	221	1.4
Hajdúság – Nyírség	5	1

Figure 13. Zones of evapotranspiration, Bodrog Basin and its catchments model area (UTM coordinate system)
 1 – state border, 2 – model boundary
13. ábra. Evapotranspirációs zónák a Bodrog-medence és vízgyűjtője modellterületen (UTM koordináta-rendszer)
 1 – országhatár, 2 – modellhatár

form. *Table 12* contains the channel material conductance values for each river.

Production and Monitoring Objects

The raw database contained 898 production objects producing more than 1000 m³/day for the technical model area. The filtered database was further queried by the depth of modeled space and by the area of the research model. As a consequence wells producing water from the Lower Pannonian and wells outside of the study area were ignored. At the end, the model contained 575 water producing objects.

These wells characteristically produce water for the local public water supply, for the agriculture and for the local industry. Vulnerable water supplies of the Bodrogtörzs waterbody are as follows: Kiszvárd, Ibrány (Jásztelep), Kótaj-Nagyhalász, Tiszabездé, Paszab, Kemece, Licse, Fényeslitke, Dombrád, Dombrád-Kistiszahát, Buj wells.

90% of all water production was below the 500 m³/d value. Water

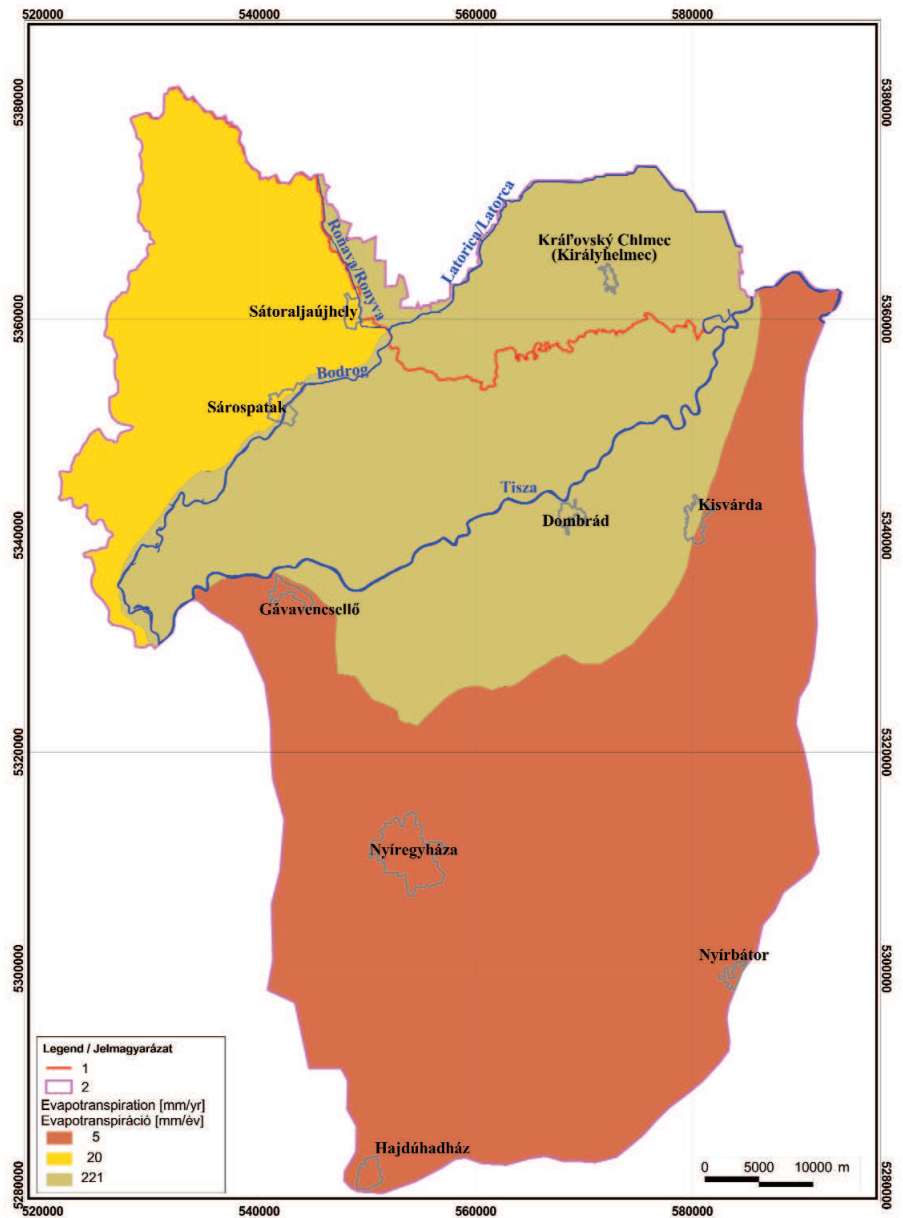


Table 11. Water level data of rivers defined in the model, based on annual mean values of 2002

River	Settlements	National code of water level gauge	UTM X	UTM Y	Water level [m a.s.l B]
Tisza	Vásárosnamény	1516	599654	5331149	102.43
Tisza	Záhony	1518	586736	5362763	97.77
Tisza	Dombrád	1520	568354	5343122	95.84
Tisza	Tiszabercel	1521	549251	5334797	94.94
Tisza	Tokaj	1719	530854	5329302	94.38
Latorca/Latorica	Nagykapos	9410	577688	5372482	97.47
Latorca/Latorica	Bodrogszerdahely	9670	555382	5360473	95.40
Bodrog	Felsőberecki	1724	551273	5356164	95.42
Bodrog	Sárospatak	1725	542603	5352075	95.03
Ronyva/Ronava	Alsómihályi	9690	545294	5373550	122.61
Ronyva/Ronava	Sátorajújhely	3059	548945	5362560	100.85

Table 12. River bed material conductance for each river

River	Hydraulic conductance of the riverbed [m ² /d]	
	minimum	maximum
Tisza	55	242
Bodrog	50	258
Latorca/Latorica	41	186
Ronyva/Ronava	350	350

production between 500 and 1000 m³/d was 7%, while over 1000 m³/d was 3% of the total water production.

Screen elevation values of the production wells are between -737.69 and 239.90 metres aBsl. Most of the wells draw water from Quaternary and from the upper part of Upper Pannonian sedimentary aquifer layers, their depth are from near surface to -150 m aBsl. Only a few wells screened for the lower sequence of the Upper Pannonian, from -150 to 737 m aBsl.

122 observation well data was built into the model, after data processing similar to the above described one. During the calibration process, water level data of five wells (1609, 2611, 4018, 4163, 4338 cadastre number) were ignored, because their data greatly differed from the data of wells close by. This way, 117 observation well data was considered in the model. Screen elevation values of the observation wells are between 68.7 and 147.61 metres aBsl.

The Run of the Model

The model was run for two steady state conditions. After the calibration of steady state, the water production state was simulated. Model parameters:

- during the model run the Slice-Successive Over-Relaxation (SOR) algorithm was used, where the permitted maximum iteration was 1000, and the so called “acceleration factor” was 0.1 and the convergent limit of water level changes was 0.3 m;

- in the second model run, depicting production conditions, the “acceleration factor” was 0.05;

- the compiled water table of the preliminary model made by the MÁFI was the starting water table for the model runs;

- the layers could be confined, unconfined and if it necessary variable transmissivity. The latter is used because of the large extent of the model area. With this method the close to the surface layers could run dry, and this type of layer definition is adaptable for the deeper saturated layers as well;

- re-saturation of the cells was not allowed.

Calibration

The measured and calculated head of the 117 monitoring wells, covering the model area quite evenly, were in accordance, the statistical parameters of this relationship are the next:

- maximum residual: 5.93 m;
- absolute residual mean: 1.153 m;
- standard error of estimate: 0.147 m;

- normalized RMS: 2.672%;
- correlation coefficient, 0.995.

Assessment of the Flow Field and Water Balance Based on the Results of the Model

In the Bodrogköz area flow field, the hydraulic heads of groundwater under natural circumstance and steady state condition is almost the same than the hydraulic head under steady state production. The regional groundwater flow direction is from the margin towards the center of the region (*Figure 14*).

Table 13 contains the results of water budget calculated for the natural state. Based on the water budget assessment the study area is in hydraulic equilibrium under natural steady-state hydrogeological conditions. Main component of recharge is the meteoric infiltration (94%), although the recharge of the alluvial sediments in the upper part of the rivers plays role as well (6%), its absolute value is significant. The discharge of the groundwater is the evapotranspiration (43%), and is the discharge (41%) controlled by the

Table 13. The components and data of water budget during the steady state condition assessment of the natural hydrogeological system

Water budget component	Amount of inflow [m ³ /d]	Amount of outflow [m ³ /d]
Infiltration	623 360	-
Evapotranspiration	-	286 600
River bed water budget	38 284	100 520
Mountainous discharge	-	274 510
Total	661 644	661 630
Difference		14
Difference [%]		~0

valleys in the mountainous areas. Furthermore, the valleys drain the area through the river channel bed, 16% of the groundwater leaves the system through it.

Results of Hydrological Model

Based on the detailed study of hydrogeological environment of the drainage basin, and on the subsurface water flow depicted by the permanent numerical hydraulic model the followings can be stated:

- in the drainage basin a gravitation driven steady-state subsurface flow system formed;

- the main recharge areas are the Nyírség and Hajdúság regions, from where the effectively infiltrating water forming the regional flow system migrating toward the central region of the basin;

- the Zemplén Mountains are significant recharge area as well, however here one part of the significant precipitation is channeled on the surface, and the drainage effect of deep cutting valleys and the numerous small springs (individually not determined in the model) on groundwater is significant as well;

- due to the basin geometry, water flows in the weath-

ered, fissured volcanite or in the alluvial sediments of the streams and reaches the basin deposits, then it shortly is discharged into the Bodrog Valley and the west side of Bodrogköz through line or through surface. From this point the rest of the water flows toward southeast, to the hydraulic minimum zone, where it is spatially discharged together with the groundwater migrating from southeast and south;

— the regional discharge area is the regions of Bodrogköz and Rétköz, where due to the basin geometry (large extent, but shallow basin) the extensive surface discharge is dominant through the intensive evapotranspiration, while the discharge along the Tisza River a line-discharge is subsidiary;

— the Bodrogköz area, the focus point of our study, due to its central location in the basin is richly endowed by subsurface water both in its natural state and under basin-wide production. This is indicated by the close to the surface water level, the presence of wetlands and the high rate evaporation fed by the upwelling subsurface water;

— adverse effects related to the withdrawal of subsurface water, such as disappearing, shrinking territory of water related ecosystems, decreasing safe yield of groundwater, do not affect the Bodrogköz region under the present production conditions;

— based on the model the Bodrogköz waterbody reaches over the Hungarian–Slovakian border, its proposed borders can be given by the following topographic elements:

- on the south, southwest and east is the Tisza from Tokaj to Záhony;
- on the east is the Slovakian–Ukrainian border from Záhony to Latorca/ Latorica;
- on the north is the Latorca/ Latorica;
- on the northwest and west is the Bodrog.

Conclusion

The results of the numerical models shown on the introduced three areas were proved the necessity of com-

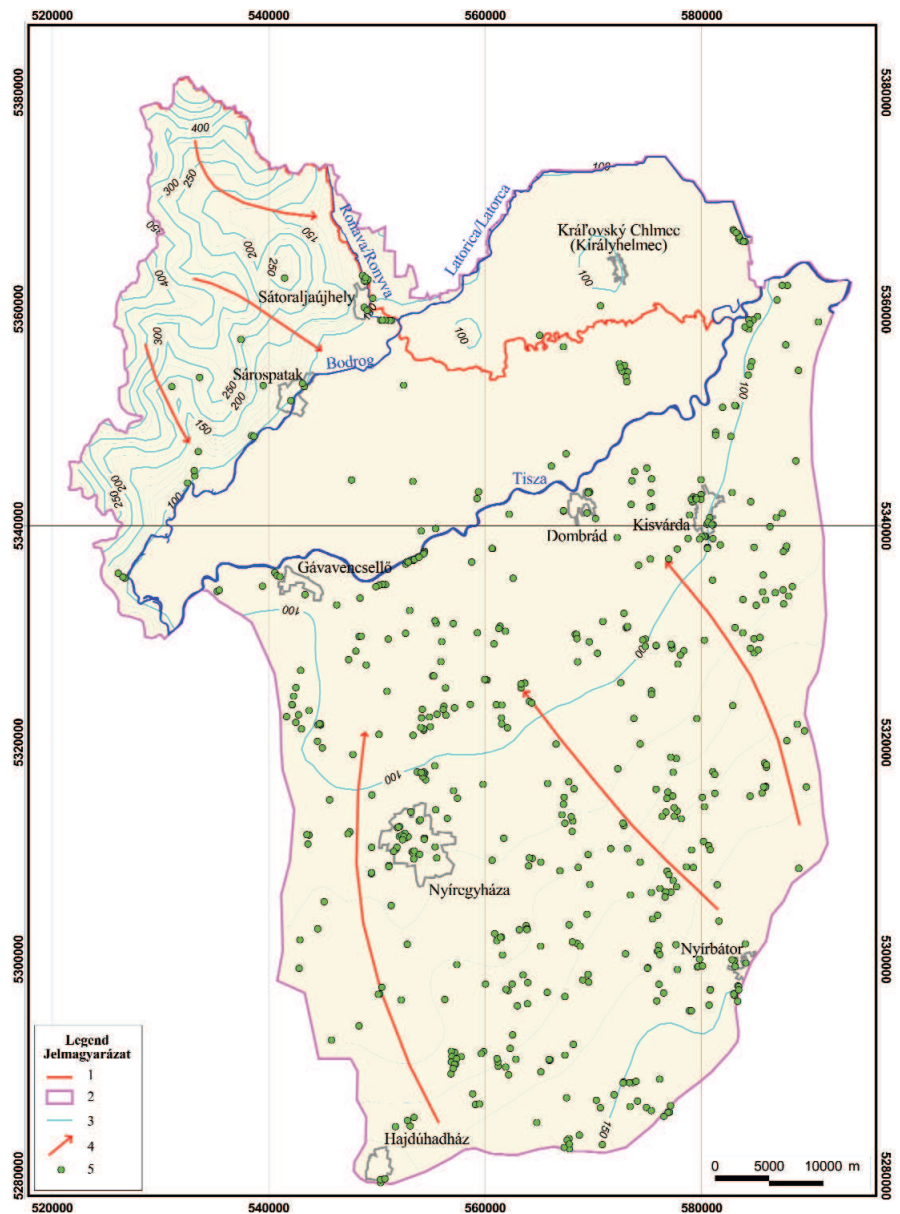


Figure 14. Calculated hydraulic potential distribution in the uppermost model-layer and the representative directions of groundwater flow, Bodrog Basin and its catchments model area (UTM coordinate system)

1 – state border, 2 – model boundary, 3 – calculated potential levels [aBsl], 4 – main direction of groundwater flow, 5 – production well

14. ábra. A legfelső modellrétegre számított hidraulikuspotenciál-eloszlás és a jellemző felszín alatti vízáramlási irányok a Bodrog-medence és vízgyűjtője modellterületen (UTM koordináta-rendszer)
1 – országhatár, 2 – modellhatár, 3 – számított vízszint [m Bf], 4 – felszín alatti víz fő áramlási iránya; 5 – termelőkút

plex handling of transboundary hydrogeological systems. These kind of bilateral or multilateral cooperations are able to support the complete data management of a system concerning its geometry and its hydrogeological environment. The regional numerical models prepared with this method are able to form the bases of detailed sub-regional studies. Moreover due to the harmonized database structure these models are suitable for emplacing the continuously generated data originated from all partner countries.

References — Irodalom

- BALOGH K. 1991: *Szedimentológia I–III.* — Akadémia kiadó, Budapest, I: 547 p, II: 356 p, III: 400 p.
- BÁLDI T. 1983: *Magyarországi oligocén és alsó-miocén formációk.* — Akadémia kiadó, Budapest, 293 p.
- BEGAN, A. (ed.) 1985: *Základná Hydrogeologická Mapa ČSSR.* — Geologický Ústav Dionýza Štúra, Bratislava.
- BOCZÁN B., FRANYÓ F., FRITS J., LÁNG S., MOLDVAY L., PANTÓ G., RÓNAI A., STEFANOVITS P. 1966: *Magyarázó Magyarország 200 000-es Földtani Térképsorozatához M-34-XXXIV. Sátoraljaújhely.* — Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 200 p.
- Európai Parlament és Tanács 2002: 2000/60/EK irányelv a közösségi cselekvés kereteinek meghatározásáról a vízpolitika területén (Európai Víz Keretirányelv, EU VKI). www.euvki.hu
- FÜLÖP J. 1994: *Magyarország geológiája. Paleozoikum I–II.* — Akadémia Kiadó, Budapest, oldalszám, I. 325 p., II: 445 p.
- GONDÁRNÉ SÓREGI K., ÁCS V., GONDÁR K., KÖNCZÖL N.-NÉ, KUN É., PETHÓ S., WEISER L. ZACHAR J., (Smaragd-GSH Kft.) 2007: Hidrogeológiai modellezés szlovák–magyar határon átnyúló három felszín alatti víztesten. — *Kézirat*, Kutatási jelentés Smaragd-GSH Kft., Budapest, 226 p.
- GYALOG L. (szerk.) 1996: A földtani térképek jelkulcsa és a rétegtani egységek rövid leírása. — Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 171 p.
- GYARMATI P., PERLAKI E., PENTELENYI L. (szerk.) 1976: *A Tokaji-hegység földtani térképe.* — Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- HAAS J. 1994: Magyarország földtana. Mezozoikum. — *Egyetemi jegyzet*, ELTE, Budapest, p. 119
- HAAS J. (szerk.) 1996: *Magyarázó „Magyarország földtani térképe a kainozoikum elhagyásával” és „Magyarország szerkezetföldtani térképe” című térképlapokhoz.* — Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 186 p.
- KORPÁS L. (szerk.) 1998: *Magyarázó a Börzsöny és a Visegrádi-hegység földtani térképéhez (1:50 000).* — Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 216 p + 1 térképmelléklet
- LESS GY. 2007: Magyarország földtana. — *Egyetemi jegyzet*, Miskolci Egyetem, Miskolc, 60 p
- Magyar Állami Földtani Intézet (MÁFI) 2007a: Magyarország felső-pannóniai képződményeinek elterjedés- és vastagságtérképe. — Digitális változat, Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- Magyar Állami Földtani Intézet (MÁFI) 2007b: A Tokaji-hegység prekvarter földtani térképe. — Digitális változat, Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- MAROSI S., SOMOGYI S. (szerk.) 1990: *Magyarország Kistájainak Katasztere.* — Magyar Tudományos Akadémia (MTA), Földrajztudományi Kutatóintézet, Budapest, 1023 p.
- TÓTH GY. (szerk.) 1986: Magyarország talajvízforgalmi térképe (1:500 000). — Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- Wasy GmbH 2003: *Feflow.* — Finite Element Subsurface Flow & Transport Symulation System, Berlin, Germany, 168 p
- Waterloo Hydrogeologic Inc. 2006: *Visual Modflow 4.2.* — Three-Dimensional Groundwater Flow and Contaminant Transport Modeling, Waterloo, Ontario, Canada, 632 p.

Numerikus hidraulikai modellezés szerepe a határ menti közös felszín alatti víztestek környezetállapotának és fenntartható használatának meghatározásában

PETHÓ SÁNDOR¹, ÁCS VIKTOR¹, GONDÁR KÁROLY¹, GONDÁRNÉ SÓREGI KATALIN¹,
KUN ÉVA¹, SVASTA JAROMIR², TÓTH GYÖRGY

¹Smaragd-GSH Környezetvédelmi és Szolgáltató Kft., 1114 Budapest, Villányi út 9.

²Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, 81704 Bratislava, Mlynská dolina 1., Slovak Republic

³Magyar Állami Földtani Intézet, 1143 Budapest, Stefánia út 14.

Tárgyszavak: magyar–szlovák, határ menti, felszín alatti víztest, regionális, numerikus hidraulikai modell, hidrosztratigráfia, vízmérleg, hidraulikus potenciál, felszíni-felszín alatti víz kapcsolata, UTM

Kivonat

Az EU-s irányelvek szerint elkészítendő vízgyűjtő gazdálkodási tervek alapját numerikus hidraulikai modellek képezhetik. Az adott modell szükségszerűen a vizsgált területet is magában foglaló regionális vízgyűjtő egészét kell, hogy érintse, mivel a kérdéses részvízgyűjtő így helyezhető el egy komplex hidrogeológiai rendszerben és ekkor kaphatunk megfelelő válaszokat az ezeket érintő kérdésekre. A Huskua 0502/166 Interreg IIIa Partnerségi Program (Enwat Projekt) keretében a Smaragd-GSH Kft., a Magyar Állami Földtani Intézet partnereként három határ menti közös felszín alatti víztest hidraulikai modelljét készítette el, melyek az Ipoly-völgy, az Aggteleki- és Szlovák-karszt, valamint a Bodrog-medence területén helyezkednek el.

Bevezetés

Az EU Víz Keretirányelv (VKI) 2000. december 22-től hatályos (Európai Parlament és Tanács 2002). Az irányelv olyan egységes vízvédelmi politika életbe lépését jelentette, amely államhatárokon túlnyúlva a vízgyűjtőkön való koordinált vízgazdálkodás megvalósulását segíti elő. A VKI szellemében egy adott hidrogeológiai egység elemzésekor célszerű rendszerelvű megközelítést alkalmaznunk, mely módszer megköveteli a különféle alrendszerek közötti kapcsolatok matematikai megfogalmazását. Ezzel az adott rendszer felszíni, valamint felszín alatti vízkészletének vizsgálata kvantitatív alapokra helyezhető. A rendszerelvű megközelítéssel az EU-s irányelvek szerint elkészítendő vízgyűjtő gazdálkodási tervek alapját numerikus hidraulikai modellek képezhetik. Az adott modell szükségszerűen a vizsgált területet is magában foglaló regionális vízgyűjtő egészét kell, hogy érintse, mivel a kérdéses részvízgyűjtő így helyezhető el egy komplex hidrogeológiai rendszerben és ekkor kaphatunk megfelelő válaszokat az őt érintő kérdésekre.

A Huskua 0502/166 Interreg IIIa Partnerségi Program (Enwat Projekt) keretében a Smaragd-GSH Kft., a Magyar Állami Földtani Intézet (MÁFI) partnereként három határ menti közös víztest és azok környezetének hidraulikai modelljét készítette el. A modellezett területek: az Ipoly-völgy és vízgyűjtője, az Aggteleki- és Szlovák-karszt területe, valamint a Bodrog-medence és vízgyűjtő területe (Smaragd-GSH Kft. 2007). A modellezett területek elhelyezkedését az 1. ábra szemlélteti. A porózus és repedezett kőzetekből felépülő Ipoly- és Bodrog-régió felszín alatti vízáramlási rendszereinek modellezése véges differencia módszerrel, Visual Modflow 4.2 szoftverrel (Waterloo Hydrogeologic Inc. 2006) történt, míg az Aggteleki- és Szlovák-karszt területére vonatkozó modell végeselemes módszerrel, Feflow5.0 szoftver (Wasy GmbH 2003) használatával készült.

A hidraulikai modellezés célja az volt, hogy a modellek keretét adjanak az Enwat Projekt során vizsgált felszín alatti víztestek mennyiségi és minőségi állapotának értékeléséhez, és ezzel segítséget nyújtson a rájuk vonatkozó vízgyűjtő gazdálkodási tervek elkészítéséhez. A jelenlegi

állapot rögzítésén kívül a hidraulikai modellezés prognózisra is kiválóan alkalmas.

A modellezés menete

A határon átnyúló projektterületek megkövetelték a közös koordinátarendszer használatát a nemzeti rendszerek használata helyett. A földtani-vízföldtani és egyéb kiegészítő adatok (domborzat, vízrajz, topográfiai elemek — 2. ábra) harmonizációja a Közép-Kelet-Európai régióra jól használható Universal Transverse Mercator (UTM) koordinátarendszerben történt, a modellezés előkészítő fázisában. A feldolgozott adatok alapján digitális formátumban elkészültek a vizsgálati területekre vonatkozó topográfiai alaptérképek és a különböző tematikus térképek, pl.: a felszíni domborzatmodell, a lejtőkategorákat, a csapadék-eloszlást, a beszivárgási és a párolgási zónák elterjedését, valamint a vízkivételi és kalibráló objektumok (források, észlelőkutak) helyzetét bemutató térképek.

A hidraulikai modellek technikai sajátossága, hogy sok esetben olyan térrészre is paramétermezőt kell előállítani, ahol nem rendelkezünk pontos adatokkal. A modellezés legnehezebb előkészítő feladata így a kutatási területek összetett földtani felépítésének 3D-ben történő ábrázolása, a szükséges egyszerűsítések elvégzése a regionális modellezés által megkívánt mértékig. A feladat végrehajtásához vertikálisan meghatároztuk a főbb hidrosztratigráfiai egységeket és ezeken belül az azonos szivárgáshidraulikai adatokkal jellemezhető, laterálisan lehatárolható hidrosztratigráfiai kategóriákat. Az egyes hidrosztratigráfiai rétegeken belüli vízföldtani kategóriákat elterjedéstérképeken ábrázoltuk. Az esettanulmányoknál az egységekre vonatkozó szivárgáshidraulikai értékeket a MÁFI, hasonló jellegű kutatásai során kialakított, adatbázisa nyomán határoztuk meg. Az azonos hidrosztratigráfiai egységen belüli paraméter-változékonyságot csak az összetettebb földtani felépítésű Aggteleki- és Szlovák-karszt esetén vettük figyelembe.

Ezt a munkát követte a modellek felépítése, majd futtatása, kalibrációja. A kialakítás első lépéseként az áramlási tér geometriáját és a 3D szivárgáshidraulikai paraméter-kiosztást képeztük le a modellekben. Mivel a rétegeket az alkalmazott szoftverekkel nem lehet kiékelni, így a modellekben az alaphegység felszíni kibukkanásainál a másutt jelentős vastagságban előforduló fiatalabb fedő összletek hegylábi elvékonyításával biztosítottuk a modellrétegek folytonosságát. Az így kialakított geometriával és a kérdéses modellrétegeken belüli szivárgáshidraulikai paraméterváltással az alaphegységi kőzetek felszín közeli mállott zónáját tudtuk definiálni. Mélyebb helyzetű rétegek kiékelődés esetén, szintén az adott folytonos modellrétegen belüli paraméterváltással követtük a hidrosztratigráfiai egységek laterális változékonyságát.

Ezt követően a peremfeltételeket (felületi beszivárgás, vízfolyások, megcsapolási elemek), a mesterséges vízkivételeket és a kalibrációs pontokat adtuk meg.

Végző fázisként, manuális kalibrációval, 'trial and error' iteratív módszerrel történő kalibrálással elkészültek az adott vizsgálati területek permanens állapotot szimuláló numerikus hidraulikai modelljei. A kalibrációs folyamat során a szivárgáshidraulikai paramétereket, a hatékony beszivárgás mértékét, a folyó- és drénhatást változtattuk. A referenciapontok mért és számított vízszintértékeit a nagyobb reliefű, összetettebb földtani felépítésű és érzékenyebb hidrogeológiai rendszert képviselő Ipoly-völgy, illetve Aggteleki- és Szlovák-karszt modelljei esetén nagyobb toleranciával fogadtuk el. A nagyobb eltérések sok esetben a magasabb térszín referenciapontjainál adódtak, melyeknél a lokális változékonyság (pl.: függő vízszintek) egy regionális modellel csak közelítően adható vissza. A tagolt terepmo- dell és a talajvízdomborzat kapcsolatát folyó- és dréntípusú, valamint a hatékony beszivárgást szabályozó határfeltételekkel kezeltük. A modellekben a talajvíztükör csak esetenként metszette a felszint, azokon a helyeken, ahol ez hidrogeológiai okokkal magyarázható: pontszerűen, az esetleg nem kötött egyéb forráskilépési helyeken, vonalmentén a mélyebb völgy-talpakon és foltszerűen a vízenyős területeken.

A következőkben, vizsgálati területenként bemutatjuk a modell-előkészítés és a modellezés menetét, valamint az elért kutatási eredményeket.

Ipoly-völgy és vízgyűjtője területére készült hidraulikai modell

A modellezett terület ismertetése

Az Ipoly-völgy modellezett terület lehatárolása az Ipoly vízgyűjtő területe és a hozzá tartozó víztestek alapján történt. A modellterület sarokpontjait az 1. táblázat összegzi UTM koordinátarendszerben.

A modellezési területet az Ipoly-völgyében húzódó magyar-szlovák határ osztja ketté. A magyarországi oldalon földrajzilag Ny-ról K-felé a Börzsöny, a Nógrádi-medence, az Északi-Cserhát és a Karancs tájaira osztható. A szlovák oldalon a terület É-i részét a Selmeci-hegység D-DK-i lejtői, a Jávoros-hegység D-i lejtői és a Szlovák Érchegeység DNy-i része képezi. D-i része a hegységek felől az Ipoly felé fokozatosan lejtő peremhegységeket és hegylábi felszíneket és a Korponai-erdő területét foglalja magába. A szegélyező hegyvidéki területek reliefje változó, de az Ipoly széles völgytalpához képest mindenképpen jelentős.

A modellezett terület egésze az Ipoly felszíni vízgyűjtő területére terjed ki. A peremi helyzetű vulkanikus hegységek lejtőit sűrű vízhálózat jellemzi, a meghatározó

1. táblázat. Az Ipoly-völgyi modellterület sarokpontjainak UTM koordinátái

	UTM X	UTM Y
minimum	324 800	5 297 650
maximum	418 050	5 370 540

vízfolyások zömmel É–D-i irányultságúak. Az Ipoly a vizsgált terület DNY-i részén torkollik a Dunába. A vizsgált vízgyűjtő állóvizekben szegény. A hegységekben számos kis hozamú (1–10 L/p) forrás fakad, mivel a felépítő kőzetek víztároló képessége kicsi. A kiterjedtebb repedésrendszerekhez tartozó források szezonálisan bővizűek is lehetnek (100–800 L/p), míg a lokális rendszereket megcsapolók csapadékszegény időszakban gyakorta kiszáradnak.

Az alacsonyabb vidékeken legjellemzőbb éves csapadékmennyiség 600–620 mm között van. Ennél kevesebb csak az Alsó-Ipoly-völgyben (580–600 mm) jellemző. A domborzat csapadéknövelő hatása egyértelműen érvényesül, a Börzsöny központi részén 800 mm, míg a Karancsban 650 mm a csapadékatlag. A legnagyobb változékonysággal a Medves vidékén találkozhatunk (610–670 mm). Az átlagosnál csapadékosabb még a Nógrádi-medence ahol 630–670 mm között változik a lehulló csapadékmennyiség. Az éves csapadékmennyiség 55–60%-a a nyári félévben hullik le az egész területen.

Az áramlási tér földtani felépítésének meghatározásához BALOGH (1991), BÁLDI (1983), FÜLÖP (1994), HAAS (1996), a MÁFI (2005) és a ŠGÚDŠ (1985) munkákat vettük alapul.

Az Ipoly modellterülete talán a legbonyolultabb földtani felépítésű a három modellezett terület közül.

Az alaphegységi képződmények a terület legnagyobb részén vastag neogén üledékekkel fedettek és csak mélyfúrásból ismertek. A terület legidősebb képződményei a terület északi részén a Nyugati-Kárpátok Veporikum-egységének paleozoos csillámpala, gneisz, amfibolit és intermedier metavulkanit kőzetei. Az ÉK-i részen a Gömörikumhoz tartozó metavulkanitok, savanyú vulkanoklasztitok, meta-karbonátok, helyenként metamorfítok alkotják a kristályos alaphegységet. A Diósjenői-vonaltól délre az alaphegység fiatalabb, felső-triász Dachsteini Mészkből épül fel. A paleozoos képződmények gyakorlatilag vízzáróak, így megfelelő szintet nyújtanak a modell vertikálisan történő alsó lehatárolásához. A Dachsteini Mészkből típusú aljzat nem vízzáró, termálvizet tárol. A dél felé egyre nagyobb mélységben (–1000) található mészkőtestből átadódó vízmennyiség a felszín közeli vizsgált víztest vízforgalma szempontjából elhanyagolható, gyakorlatilag önálló rendszernek tekinthető, ezért felszíne szintén alkalmas modellhatárnak bizonyult.

A fedőhegységi porózus üledékek nagy része Magyarországon oligocén vízzáró agyag és agyagos aleurolit. A miocén homokkővek és homokok jelentős része már lepusztult, inkább csak a szlovák oldalon találhatók meg a badeni vulkanitok déli előterében. A több száz méter vastagságú oligocén üledék az Ipolytól délre így jórészt csak negyedidőszaki képződményekkel fedett.

A felszínen nagy területen találhatók badeni vulkanitok. Magyar oldalon a Börzsöny rétegvulkáni és a Cserhát hasadékvulkáni képződményei tartoznak ide. Szlovák oldalon az elterjedésük jóval nagyobb, a Jávoros nagy kiterjedésű rétegvulkánja csaknem elfedi a modellezett terület nyugati részét. Az andezitösszletek hasadékvizet

tárolnak, számos kishozamú forrás hozza felszínre a vizüket. Gyakori az elszigetelt kis felszín alatti vízgyűjtő, ami nagyon megehezíti az egységes potenciálszint meghatározását a területen.

A modellezés és a határral osztott Ipoly víztest vízgazdálkodási kérdéseinek szempontjából kiemelten fontos szerepet játszik az Ipoly negyedidőszaki allúviuma, amely nagyobb részben vulkanit anyagú, alárendelten kvarckavicsból áll. Az allúviumok, bár genetikájuknak köszönhetően szivárgáshidraulikai tulajdonságaik lokálisan változékonyak lehetnek, általánosan jó–kiváló vízvezető képességű képződményként jellemezhetők. A magyar oldalon az Ipoly-völgyben található települések vízellátása ezen a képződményen alapul.

A modell felépítése

Tekintettel a terület vízföldtani adottságaira az Ipoly-völgyre és vízgyűjtőjére vonatkozó hidraulikai modellhez véges differencia elven működő szoftvert (Visual Modflow 4.2. (Waterloo Hydrogeologic Inc. 2006) használtunk. A modellezési terület nagyságából, a modellezési feladat regionális jellegéből adódóan, és figyelembe véve a felhasznált szoftver lehetőségeit a modellterületen 250×250 méteres hálókiosztást alkalmaztunk.

A területen előforduló földtani képződményeket egyszerűsítési eljárások után az alábbi négy hidrosztratigráfiai egységbe soroltuk be:

1. réteg: Negyedidőszaki porózus víztároló képződmények.
2. réteg: Badeni vulkanitok: repedezett, hasadékos víztároló képződmények.
3. réteg: Oligocén és miocén képződmények: agyagos homokok, homokkővek; porózus víztároló képződmények.
4. réteg: Pretercier aljzat: gyakorlatilag vízzáró.

Az egyes hidrosztratigráfiai rétegek és laterálisan meghatározott vízföldtani egységek jellemző szivárgási tényező értékeit a 2. táblázat foglalja össze.

A modellezési terület határát és a preneogén aljzat felszínét impermeabilis peremként határoztuk meg, amivel a vizsgált medence önálló rendszerként vált értékelhetővé.

A csapadék eredetű beszivárgást a területre hulló csapadék mennyisége, valamint a földtani felépítés alapján számítottuk. A régióban a felszínen előforduló földtani képződmények hidrogeológiai jellegük alapján — a modellben közvetlenül használt kiosztásnál részletesebben — az alábbi 15 kategóriába nyertek besorolást: agyag, agyagos lösz,

2. táblázat. Az egyes földtani kifejlődések során használt szivárgási tényezők

Földtani kifejlődés	K_{h} (laterális) [m/s]	K_{v} (vertikális) [m/s]
Repedezett vulkanit	$1,00 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-5}$
Lösz	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$
Homok	$5,00 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-5}$
Agyag	$1,00 \times 10^{-8}$	$1,00 \times 10^{-8}$
Aleurit	$1,00 \times 10^{-7}$	$1,00 \times 10^{-7}$
Agyagmárga	$5,00 \times 10^{-6}$	$1,00 \times 10^{-7}$

agyagmárga, homok, homokkő, karszt, kavics, lösz, löszös homok, mészkő, márga, repedezett homokkő, repedezett metamorf kőzet, repedezett vulkanit, tufa. A 15 kategóriát alapul véve meghatároztuk a modellterületen a beszivárgást befolyásoló, felszínen előforduló hidrosztratigráfiai egységeket (3. ábra). Ezekhez az egységekhez jellemző beszivárgási százaléktételeket rendeltünk, a MÁFI korábbi, hasonló jellegű munkái során kidolgozott, regionálisan megbízhatóan alkalmazható adatbázisa alapján (3. táblázat).

3. táblázat. A felszíni földtani képződményekhez rendelt beszivárgás értékek (%)

Képződmény	Képződmény jele	Beszivárgás (%)
Agyag	A	3,7
Agyagos lösz	AL	4,3
Agyagmárga	AMG	5,0
Homok	H	10,8
Homokkő	HK	12,5
Karszt	K	33,3
Kavics	KAV	13,3
Lösz	L	6,0
Löszös homok	LH	7,5
Mészkő	M	18,3
Márga	MG	5,3
Repedezett homokkő	RH	10,0
Repedezett metamorf kőzet	RM	11,7
Repedezett vulkanit	RV	13,3
Tufa	T	6,3

A modellezett területre 32 csapadékmérő állomás 23 éves (1980–2002) időszora alapján, az évenkénti összes csapadék mennyiségekből átlagot számoltunk, majd átlagértékekkel csapadékeloszlás térképet szerkesztettünk.

A továbbiakban elkészítettük az egyszerűsített földtani térkép és a csapadékeloszlási térkép közös fedvénytérképét (4. ábra), mellyel a beszivárgási zónák meghatározhatókká váltak. A vizsgált terület jellemző beszivárgási értékei a földtani kifejlődéstől függően 21–85 mm/év között változtak.

A felszíni vízfolyásokat — kivéve a Duna folyamot — a modellbe, mint folyóelemeket építettük be, vagyis megpróbáltuk figyelembe venni a mederfenéken átadódó, illetve a talajvízből a folyóba bejutó víz mennyiségét. A felvett modellünk DDNy-i határvonala mentén futó Dunát állandó nyomású cellaként vettük figyelembe.

A folyók vízszintjét a réteg topográfiai magasságához közelítettük. Mivel a felszíni vízfolyások felszínhez mért bevágódásának nagyságát nem ismerjük a modellezett terület egészére, ezért azzal a feltevessel éltünk, hogy a patakban futó víz szintje minden esetben az adott pont topográfiai felszíne alatt egy méterrel található.

A folyóelem fekvésintjét, amitől függ, hogy a folyóelem felől a talajvíz felé beszivárog, vagy kiáramlik, a patakok esetében egységesen 0,8 méterben definiáltuk. Az Ipoly folyónál — tekintettel arra, hogy nagyobb mennyiségű vizet szállít — a mederfenék fekvésintjét a folyó felső szakaszán 1,0, míg lejjebb 1,5 méteres értékkel adtuk meg. A folyómeder ún. áteresztőképességét egységesen 100 m²/nap értékkel adtuk meg a patakoknál, az Ipolynál 150 m²/nap

értéket definiáltunk. A folyóelemeken megadott magas áteresztőképesség a durva hálóméret miatt valójában relatív alacsony értéket jelent, mivel ebben az egyetlen értékben vonjuk össze a folyó szélességét, valamint az eltömődött fenékreteg vastagságát és hidraulikus vezetőképességét is.

A modell számára további bemenő paraméterek a vízkivételi helyek, illetve a vízkivételek nagysága. A modellezett területre összesen 325 db, 1000 m³/év vízkivételnél jelentősebb termeléssel bíró objektum esik. Az Ipoly-völgy modellezett területén található jelentősebb magyar vízbázisok a Dejtári Vízmű, a Perőcsény–Tésai Vízmű, a Szécsényi Vízmű és a Vámosmikolai Vízmű.

A modell futtatása

A modell futtatását a nagyméretű egyenletrendszerek megoldásához kifejlesztett SSOR megoldási algoritmussal oldottuk meg, az iteráció gyorsítása érdekében az iteráció során elérni kívánt pontosságot 0,5 méteresnek adtuk meg, mivel megítélésünk szerint a cm-es pontosság a regionális szinten nem várható el, csupán a számítási időt növeltük volna feleslegesen. A modellt permanens állapotra futtatuk, az időbeli változásokat a modellel nem vizsgáltuk, vagyis feltételeztük, hogy minden egyes figyelembe vett paraméter időben jellemző átlagos érték.

Kalibráció

A modell kalibrálását a területre eső vízszintfigyelő objektumokban mért, és a modellel ugyanarra a pontra számított vízszintek összevetésével végeztük, a lehető legjobb illeszkedésre törekedve. A modellezett térrészre a vízszintfigyelő kutakon kívül a kalibrációhoz figyelembe vettük a területen található egyéb vízszintfigyelési pontokat, mint a források fakadási szintjeit, valamint a vízfolyások vízmércén mért vízállások szintjeit is. Így az Ipoly-völgy területén mérhető 90 m Bf szinttől, a Börzsönyben mérhető 500 m Bf szint közötti intervallumban összesen 292 db pontra tudtuk összehasonlítani a modellel számított és a valós mért vízszintértékekkel.

A modellel számított és a mért értékek összevetése jó egyezést mutat a vizsgált terület alacsonyabb térszíneire, vagyis az Ipoly folyó völgyére, melynek közelítő tengerszint feletti magassága a 90–280 m Bf tartományba esik. Itt a mért és a számított értékek közötti eltérés kisebb, mintegy 10 méter nagyságú. A Börzsöny területén néhány adat tekintetében ennél nagyobb eltérés észlelhető. Tekintettel a vizsgált tér nagyságára, a regionális léptékhez igazított modellháló kiosztására, valamint a térszínben előforduló jelentős szintkülönbségre, a mért és számított értékek között a hegyvidéki területeken néhány esetben megjelenő 10 métert meghaladó hibát elfogadhatónak tartjuk, főként úgy, hogy célunk elsődlegesen az Ipoly folyó allúviumának modellezése volt. A hiba elfogadhatóságát az is indokolja, hogy a Börzsönyben, a magas térszínen kishozammal fakadó források valószínűleg lokális vízrendszereket jeleznek, amelyek a vizsgálat szempontjából alárendelt jelentőségűek.

Áramlási tér és a vízháztartás elemzése a modellezett eredmények alapján

A numerikus modellezés eredményeként, a víztestek leírásához két fontos kimenő paramétert kaptunk meg, egyrészt a számított hidraulikus potenciál-eloszlást, másrészt a modellezett terület vízmérlegét.

Az áramlási irányokat a hidraulikus potenciál viszonyok határozzák meg. A legfelső modellréteg hidraulikus potenciáleloszlása a térszint követi, vagyis a Börzsönyben (délen) és szlovák oldalon a Jávoros területén (északon) magasak a számított vízszintek, míg az Ipoly völgyében alacsonyok (5. ábra). A számított vízszinteloszlás jól érzékelteti, hogy a vizsgált régió vizeinek legfontosabb feláramlási zónája, megcsapolódási területe az Ipoly folyó völgye. A legjelentősebb vízkivételi terület — a magyarországi dejtári öblözet — mind a szlovákiai, mind a magyarországi emelt térszínnek felől kap utánpótlódó vízkészletet.

A modellel számított vízmérlegben (4. táblázat), az alkalmazott peremfeltételek miatt (vízzáró peremek a vízválasztók mentén) csak a modellezett területen belüli, a hidrológiai folyamatban résztvevő egyes elemek adhatók meg.

4. táblázat. Számított vízmérleg, Ipoly-völgy és vízgyűjtője modellterület

	Bemenő mennyiségek (m ³ /nap)	Kimenő mennyiségek (m ³ /nap)
Csapadékbeszivárgás	591 200	0
Párolgás	-	15 026
Kutas vízkivétel	-	43 388
Folyómedrek vízforgalma	268 430	721 180
Duna (konstans hidraulikus potenciál)	-	81 306
Összesen	859 630	860 900
Különbség (bemenő-kimenő)		-1270
Eltérés [%]		~0

A modellel a vizsgálati területre számított bemenő és kimenő értékek teljes mennyisége jó egyezést mutat, eltérésük a jelzett vízforgalom mellett gyakorlatilag elhanyagolható (~0%). A modellezett területen az évtizedek óta tartó víztermelés nyomán kivett vízmennyiséget a hidrológiai folyamatban résztvevő elemek (csapadékbeszivárgás és felszíni vízfolyások) pótolni tudják. A folyóból történő készletváltozás nagysága meglehetősen nagy. Fontosnak tartjuk azonban megjegyezni, hogy a kimenő mennyiség nagyságát a Duna folyam, mint a DDNy-i modellhatáron elhelyezkedő konstans hidraulikus potenciálú perem okozza, amely az Ipoly és az Ipoly allúviumának megcsapolója.

Modellezési eredmények összefoglalása

A vízgyűjtő medence részletesen feldolgozott hidrogeológiai környezetének, valamint az az alapján felépített permanens numerikus hidraulikai modell által feltárt felszín alatti vízáramlási tér ismeretében összefoglalásként a vizs-

gált víztestet is magába foglaló Ipoly-völgy és vízgyűjtője felszín alatti vízrendszeréről megállapítható, hogy:

- a vizsgált komplex földtani felépítésű, hasadékosporózus vízgyűjtő rendszer vízföldtani egységei érzékeny hidraulikai kapcsolatban állnak egymással;

- a völgyyszerű vízgyűjtő medencében gravitáció által vezérelt permanens felszín alatti vízáramlási rendszerek alakultak ki, melyekben a regionális és a köztes rendszerek egyaránt létrejöttek;

- a fő beáramlási területek az Ipoly-völgyet szegélyező hegységek területei, ahonnan a hatékonyan beszivárgó, a felszín alatti vizeket tápláló víz regionális mélyáramlások, illetve köztes vízáramrendszerek révén a völgy központi régiója felé áramlik;

- a regionális megcsapolódási terület az Ipoly-völgy régiója, ahol az intenzív párolgással történő kiterjedt felszíni megcsapolás és az Ipoly, mint vonalas felszín alatti vízmegcsapoló elem együttes hatása jelentkezik;

- az Ipoly-völgy alsóbb szakasza és a Duna szoros hidraulikai kapcsolatban van, azaz az Ipoly allúviumából felszín alatt távozó víz mennyiségét a Duna kontrollálja;

- a vizsgálat szempontjából kiemelt jelentőségű Ipoly-völgyi terület medenceközponti-tengely helyzete révén természetes körülmények mellett jó vízellátottságú.

Aggteleki- és Szlovák-karszt területére készült hidraulikai modell

A terület ismertetése

Az Aggteleki- és Szlovák-karszt modellterületének sarokpontjait az 5. táblázat összegzi UTM koordináta-rendszerben.

5. táblázat. Az Aggteleki- és Szlovák-karszt modellterület sarokpontjainak UTM koordinátái

	UTM X	UTM Y
minimum	444 100	5 342 900
maximum	513 700	5 395 130

A modellezett terület mind földrajzilag, mind szerkezetföldtanilag két fő egységbe tartozik. A terület jelentős részét a magyar és szlovák oldalon is megtalálható Gömör-Tornai-karszt foglalja el, kisebb részben a Szendrői-hegység (Cserehát) területére terjed ki. A projekt szempontjából kiemelkedően fontos, államhatárral osztott Aggteleki- és Szlovák-karszt víztest így csak egy része a teljes modellezett területnek, a nagy kiterjedésű Gömör-Tornai-karszt felszínen található egysége. A fedett, délnyugati irányban egyre mélyebben található mélykarsztos területek, valamint a környező nem karsztos, rossz vízvezető képességű kőzetekből felépülő területek bevonására a regionális áramlási rendszerek minél pontosabb ismerete szempontjából volt szükség. Így a kutatási és modellezett térrész határai nyugaton és délen a Sajó völgye, északon az Aggteleki- és Szlovák-karszt elterjedési határa, keleten a paleozoos összletek

elterjedési határa, a k.2.16.2. jelű termálkarszt víztest határával összhangban.

A modellezett területen található legfőbb vízfolyások a Sajó, a Bódva, a Torna, a Jósua, és a Rakaca. E vízfolyások vízgyűjtő területe lefedi a modellezett terület legnagyobb részét, a terület DK-i része már a Hernád vízgyűjtőjéhez tartozik.

Az évi csapadékmennyiség területi eloszlásában a domborzat módosító hatása jelentkezik. A magasabb hegyekben (Aggteleki-karszt, Rudabányai-hegység); az átlagos évi csapadék mennyisége 670–710 mm között változik. A legkevesebb csapadék a Cserehát vidékén hullik: a Keleti-Cserehátban 600–640 mm, a Nyugati-Cserehátban még ennél is kevesebb, 580–620 mm csapadék esik évente. Viszonylag csapadékszegény a Sajó-völgy keleti, és a Hernád-völgy déli része is, ahol az évi átlagos csapadék mennyiség nem éri el a 600 mm-t (MTA 1990).

Az áramlási tér földtani felépítésének meghatározásához a MÁFI (2005), a ŠGÚDŠ (1985), FÜLÖP (1989, 1994), HAAS (1994) és LESS (2007) munkáit vettük alapul.

Mint az előzőekben említettük a modellezett terület alapvetően két szerkezetföldtani egységből áll. E két egységet eltérő földtani fejlődéstörténet és eltérő földtani képződmények jellemzik.

Míg a Szendrői-hegység a Bükki szerkezeti egység („Bükkium”) részét képezi, dél-alpi–dinári rokonságú paleozoos kőzetegyüttessel, addig az Aggteleki- és Szlovák-karszt, valamint a Rudabányai-hegység a Belső-Nyugati-Kárpátok takarós rendszerének a része, felépítésükben döntően a triász időszi karbonátos kőzetek vesznek részt. A két szerkezetföldtani egységet a vízföldtani szempontból is kiemelt jelentőséggel bíró Darnói eltolódási szerkezeti zóna választja el egymástól. A Rudabányai-hegység gyakorlatilag a darnói eltolódási rendszeren belül foglal helyet, földtani felépítése, szerkezetföldtani viszonyai ennek megfelelően meglehetősen bonyolultak.

A vizsgált térség vízgazdálkodási és áramlási szempontból is legfontosabb vízföldtani egysége a horizontálisan és vertikálisan is nagy kiterjedésű triász mészkőösszlet, amely az Aggteleki- és Szlovák-karszt területén fedetlen helyzetben található, egyébként oligo-miocén porózus képződményekkel fedett. A modellterület DNY-i peremén a mészkőösszlet felszínének mélységét –1200 m-re becsüljük (6. ábra). Az egységesen jó vízvezető képességű képződményben alárendelten homokkő- és agyagpala-betelepülések fordulnak elő, de ezek csak a lokálisan csökkentik az összletre jellemző szivárgási tényező értékét, regionális léptékben hatásuk nem vizsgálható.

A modellezett terület legjelentősebb utánpótlási régiói az Aggteleki- és Szlovák-karszt területén található karsztosodott fennsíkok, (Pelsőci-fennsík, Szilicei-fennsík, Felső-hegy és Aggteleki-karszt — 7. és 8. ábrák), ahol többrökön és víznyelőkön keresztül koncentráltan jut a felszín alá a beszivárgó csapadék.

A fedetlen mészkőterületeken a felszín alatt több száz méterig, méltán világhírű, nagy, összefüggő barlangrendszerek (pl. Domica–Baradla-barlangrendszer), és kisebb

járatrendszerek alakultak ki. Az Aggteleki- és Szlovák-karszton mintegy 712 db változatos képződésű barlang ismert. Jelenlegi hidrológiai szerepüket tekintve az aktív, egész éven át vizet vezető barlangok éppúgy megtalálhatók, mint az időszakosan aktív, csak hóolvadás vagy nagy mennyiségű csapadék lehullása esetén működő rendszerek, és a hidrológiai aktivitásukat már teljes egészében elvesztett, a pusztulás-feltöltődés stádiumában lévő üregek.

A karsztos formakincs részletes leírása és a barlangrendszerek működésének ismertetése egy regionális modellnek nem feladata. Ami a modellezés szempontjából azonban lényeges, hogy a karsztrendszer egy hierarchikusan felépített rendszer, ahol megkülönböztetünk diffúz és járatáramlást. A járatáramlás a barlangrendszerekhez kötött. A karsztvízszint feletti, alapvetően függőleges irányú vízmozgással jellemzett vadózus zónában kifejlődött és a karsztvízszint közelében lévő, közel horizontális vízmozgással jellemzett zónában kialakult barlangrendszerekben történő vízmozgást a regionális modellezés során nem tudjuk figyelembe venni.

A karsztvíz szintje alatt, a freatikus zónában kioldódott szakaszokat is magukba foglaló rendszereket a véges elemes elven működő szoftver számítástechnikai szempontból már figyelembe tudná venni, viszont ezen kevésbé vagy alig ismert barlangrendszerek geometriai helyzetét nem tudjuk meghatározni. A karsztvíz szintje alatti rendszereket ezért kvázi porózus rendszerként kell kezelni, ami regionális szinten elfogadott megközelítés. Természetesen a járatrendszeres zóna a legjobb vízvezető képességű térrész a modellben.

A modell leírása

A véges elemes modellezési feladatokban fontos szerep jut a hálógenerálásnak. A rács horizontális kialakításában elsődlegesen már az előzőekben ismertetett modellhatár, a felszíni vizek hálózata, a tektonikai vonalak, a földtani egységek határai, valamint a termelő-, és figyelőkutak, források pontjai játszanak szerepet. A létrehozott modell összesen 148 940 db véges elemből és 91 530 db csomópontból áll.

A modell további határai a következők:

— A modell felső határoló felületének a terepszintet definiáltuk, esetünkben a modellező szoftver lehetőséget nyújt ún. moving surface (mozgó felszín) eszköz használatára, mely az első réteg felszínét a telített zóna határához igazítja, ezáltal előnyösebb futtatási környezetet biztosítva.

— A modell alsó határa az alaphegységben definiált –3500 m Bf szintű vízszintes sík, melyet vizsgálatunk szempontjából vízáróként értékelünk.

Mivel rétegeket kiékelni nem lehet, így azokon a területen, ahol az alaphegység a felszínen van ott további rétegfelszínnek beiktatásával biztosítottuk a fedő rétegek folytonosságát.

A modellezett teret vertikálisan 5 rétegre osztottuk az alábbiak szerint:

1. réteg: Negyedidőszaki rétegek.
2. réteg: Oligocén–miocén rétegek.
3. réteg: Meozoos karsztosodott összlet – paleozoos képződmények.
4. réteg: Meozoos kevésbé vagy nem karsztosodott összlet – paleozoos képződmények.
5. réteg: Modellfektűtő paleozoos képződmények.

Az egyes hidrosztratigráfiai egységek szivárgási tényező mezőinek definiálásakor elsősorban korábbi tapasztalatainkra (MÁFI adatbázis), valamint a szakirodalmi adatokra támaszkodtunk. A rétegek folyamatosságának feltétele miatt az egyes fedőrétegek hiányát a karsztos területeken paraméterváltással oldottuk meg, így ott a felső két réteg a fellazultabb és jobban karsztosodott réteget jelenti. A modellben alkalmazott szivárgási tényező értékeket a 6. táblázatban foglaltuk össze.

A modellezési input paraméterek közül kiemelten fontos a felszíni vízfolyások paramétereinek megadása. A vízfolyások szintjeit a terepmodellből származtattuk, lévén, hogy a patakok a terepfelszínbe némiképp bevágódva folynak. Mederellenállással adtuk meg az egységnyi nyomáskülönbségre jutó ki, ill. bejutó hozamot. Esetünkben korlátozó feltételt (Constrain) is szabtuk, a folyópontokon csak kilépő hozamot engedélyeztünk.

A karsztos és nem karsztos területeken egyaránt megtalálható nagyszámú forrás csomóponti fix nyomású peremfeltételként lett definiálva. Azokat a forrásokat, amelyek nem a telített zóna szintjét jelzik, nem tudtuk figyelembe venni.

Mint azt már az előzőekben ismertettük, a rendszer központi beszivárgási területe az Aggteleki- és Szlovák-karszt területe, ahol átlagosan 33%-os beszivárgási értékkel számoltunk. Ugyanakkor beszivárgással a teljes modellezett területen számolni kell. Az egyszerűsített földtani térképen (7. ábra) látható, felszíni képződmények (agyag (A), agyagos lösz (AL), agyagmárga (AMG), homok (H), homokkő (HK), karszt (K), kavics (KAV), lösz (L), löszös homok (LH), mészkő (M), márga (MG), repedezett homokkő (RH), repedezett metamorf kőzet (RM), repedezett vulkanit (RV), tufa (T)) elméleti beszivárgási értékeit a korábbi 3. táblázatban foglaltuk össze.

A területre jellemző beszivárgási értéket úgy kaptuk meg, hogy a 24 csapadékmérő állomás 23 éves idősorából számolt átlagos évi csapadékmennyiségeket megszoroztuk az adott kőzetre jellemző beszivárgási százalékkal (8. ábra).

A beszivárgott csapadék a felszín alatti vízrendszerből modellezési szempontból a következő módokon távozhat:

- természetes forrásokon keresztül a felszínen;
- alluviális hozzászivárgás révén a völgyekben;
- mesterségesen, termelőkutás vízkivétellel;

— a hegységperemen és a medenceüledékek határán a felszín alatt elszivárogova.

A területre eső karsztforrások erősen utánpótlásfüggők, adott térségben maximálják a karsztvízszintet. Az ivóvízkivételek egy része forrásfoglalásból történik (pl. az aggteleki Tohonya-forrás, vagy a komjátói Pasnyag-forrás). Ezen forrásoknak jól ismerjük, a legtöbb forrásnak azonban csak becsülni tudjuk a hozamát. A források a modellben állandó nyomású csomópontokként lettek definiálva, így hozamuk kalibrációs elem. A permanens numerikus modellezés sajnos a karsztforrások hozamában mutatkozó rendkívüli szélsőségeket nem tudja figyelembe venni, csak átlag értékekkel tudunk számolni.

A területre eső kutas vízkivételek esetében a víztermelő objektumok 2002. évi átlagos hozamadatából indultunk ki, ahol ez nem volt elérhető, ott korábbi évek átlagos termelését használtuk fel.

Modell futtatása

A modell permanens áramlást szimulál, a telítetlen zóna elhagyásával. Az 1–3. réteg nyílt/zárt tükrű, míg az alatta lévő rétegek szigorúan zárt tükrűek. A karsztvízszintet a 3. réteg nyomásszintje adja meg.

Kalibráció

A modell futtatása közben összesen 84 db észlelőkút átlagos mért vízszintjét hasonlítottuk össze a számított eredménnyel. A mért és számított értékek különbsége 52 db objektumnál volt 15 m alatti, ami kielégíti a regionális permanens modelltől elvárható pontosságot.

A hegységi területeken a számított vízszintek alacsonyabb helyzetűnek adódtak, mint ahogy az egyes források fakadási szintjéből következtethető lenne. Ennek oka, hogy a telítetlen zóna vastagságának így az összefüggő karsztvíz szintjének meghatározása rendkívül sok bizonytalanságot hordoz magában. Léteznek szerkezetileg, földtanilag elszigetelt blokkok, ahol a források fakadási szintjei nem feltétlenül a telített zóna határát jelölik ki.

6. táblázat. Hidrosztratigráfiai egységek és azok szivárgási tényező (K [m/s]) értékei

Vízföldtani egységek	K_x (horizontális) [m/s]	K_z (vertikális) [m/s]
Jól karsztosodott, repedezett, mészkő	$4,48 \times 10^{-4} - 6,56 \times 10^{-4}$	$4,48 \times 10^{-4} - 6,56 \times 10^{-4}$
Agyagos fedőüledékek	$1,70 \times 10^{-6} - 8,00 \times 10^{-6}$	$1,70 \times 10^{-6} - 8,00 \times 10^{-6}$
Homokos, aleuritos, löszös fedőüledékek	$2,60 \times 10^{-5} - 9,80 \times 10^{-5}$	$2,60 \times 10^{-6} - 1,96 \times 10^{-5}$
Kavicsos fedőüledékek	$3,10 \times 10^{-4} - 4,91 \times 10^{-4}$	$3,10 \times 10^{-4} - 4,91 \times 10^{-4}$
Kis mértékben repedezett, gyengén karsztosodott triász mészkő különböző mélységekben	$1,74 \times 10^{-4} - 2,30 \times 10^{-4}$	$1,74 \times 10^{-4} - 2,30 \times 10^{-4}$
Nem, ill. alig repedezett mészkő	$5,00 \times 10^{-7} - 5,00 \times 10^{-8}$	$5,00 \times 10^{-7} - 5,00 \times 10^{-8}$
Darnó-zóna, kristályos aljzat	$1,00 \times 10^{-8} - 5,00 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-8} - 5,00 \times 10^{-9}$

Áramlási tér és a vízháztartás elemzése a modellezett eredmények alapján

A numerikus modellezés eredményeként, a víztestek leírásához két fontos kimenő paramétert kaptunk meg, egyrészt a számított hidraulikus potenciáeloszlást, másrészt a modellezett terület vízmérlegét.

A számított hidraulikus potenciáeloszlás alapján megállapíthatók a fő áramlási irányok, melyek elsősorban É–D-i, illetve a hegységek felől ÉNy–DK-i, ill. ÉK–DNy-i irányúak (9. ábra). A hegységi területeken, mivel a háromfázisú zóna nagy tömegét elhagytuk, a domborzati hatás jelentősen mérséklődik. A Felső-hegy, az Alsó-hegy és a közöttük húzódó Tornai-medence modellünkben folytonos áramlási térben helyezkedik el, amire mérési adatunk egyelőre nincs, de a mélyáramlás valószínűsíthető. Az előtéri területeken a talajvízdomborzat a felszín követi, a megcsapolási zónák a folyóvölgyek.

A modellezéssel vizsgált térrész vízmérlegét tekintve a belépő mennyiség: 783 663 m³/nap; a kilépő vízmennyiség: 783 749 m³/nap (7. táblázat). A belépő és a kilépő mennyiségek különbsége (záróérték): 86 m³/nap, azaz az eltérés a jelzett vízforgalom mellett gyakorlatilag elhanyagolható (~0%). A beszivárgás értéke megegyezik a bemenő vízmennyiséggel, mivel a folyóhálózat csomópontjairól nem engedünk belépő

7. táblázat. Vízmérleg-komponensek és azok adatai a medence természetes hidrogeológiai rendszerének permanens állapotú vizsgálatakor

Vízmérleg komponens	Bemenő vízmennyiség [m ³ /nap]	Kilépő vízmennyiség [m ³ /nap]
Beszivárgás	783 663	-
Kutas vízkivétel	-	5 913
Folyómedrek vízforgalma	-	606 712
Források	-	171 124
Összesen	783 663	783 749
Különbség [m ³ /nap]	86	
Eltérés [%]	~0	

hozamot. A termelőkutas vízkivétel: 5 913 m³/nap. A folyókon és a fix nyomású csomópontokon kilépő hozamarány: 78–22%. Az adatokból látszik, hogy a teljes modell területére számított vízmérleg hibája elenyészően kicsi, a belépő, illetve kilépő mennyiségek egyensúlyban vannak, így változatlan bemenő paraméterekkel a modellben jelentős víztermelés forráshozam csökkenést vonna maga után.

Modellezési eredmények összefoglalása

Az Aggteleki- és a Szlovák-karszt területére készült numerikus hidraulikai modell bemutatta, hogy:

— A karsztvízrendszer egyensúlya döntően a vízbetáplálást szabályozó környezeti tényezőktől, legfőképpen a csapadék mennyiségétől függ. Ezért a rendszer az éghajlati változásokra rendkívül érzékeny.

— Főként a források által történő megcsapolással a terület vízháztartása természetes egyensúlyban van.

— A kutakkal történő víztermelés jelentős növelése, illetve a szélsőségesen szárazzá váló időjárás a vízmérleg negatívvá válását idézné elő, ami a természetben a forrás-hozamok csökkenését jelenti. A víztermelési céllal foglalt források elapadása súlyos vízellátási problémákat idézhet elő.

Bodrog-medence és vízgyűjtője területre készült hidraulikai modell

A Bodrog-medence és vízgyűjtője modellterületének sarokpontjait a 8. táblázat összegzi UTM koordináta-rendszerben.

8. táblázat. A Bodrogközi modellterület sarokpontjainak UTM koordinátái

	UTM X	UTM Y
minimum	520 000	5 269 000
maximum	599 000	5 390 000

A terület öt meghatározó tájegysége és azok domborzati viszonyai északnyugatról dél felé haladva a következők: a nagy reliefű Zempléni-hegység; kis reliefű Bodrogköz és Rétköz; valamint a Nyírség és Hajdúság homokháttakkal tagolt felszíne.

A medence felszín alatti vízforgalma szempontjából a hegyvidék és a kiemelt homokhátas térség regionális beáramlási, míg a mélymedence regionális megcsapolási területként értékelhető.

A nyíltfelszíni állóvizekben szegény terület meghatározó vízfolyásai a Tisza, a Bodrog és a Latorca, valamint a vízgazdálkodási szempontból fontos Ronyva.

Az Észak-alföldi régióban észak és kelet felé növekszik az évi csapadékösszeg, melynek mennyisége 520–660 mm évente. A Zempléni-hegység vidéke ennél csapadékosabb, 600–700 mm a jellemző éves csapadékmennyiség (MTA 1990).

A MÁFI (1966, 1976, 1986, 1996, 2007a, 2007b) és a ŠGÚDŠ (1985) munkái alapján jelen helyütt a vizsgált terület földtani felépítésének rövid, áttekintő jellegű ismertetésre nyílik lehetőség.

A vizsgált terület alaphegységét proterozoos-paleozos kristályos kőzetek alkotják. A badeni–szarmata–alsó-panóniai korú zempléni-hegységi Tokaji Vulkanit Formáció kőzetei az alaphegység vulkáni tevékenységet kísérő, 3000 métert meghaladó beszakadási területén törtek a felszínre. A hegységet felépítő döntően riolit, dácit és andezit lávakőzetekből, valamint piroklasztitokból felépülő vulkanit rossz vízvezető képességű. A vulkanitok vízvezető képessége a mállottság csökkenésével lefelé fokozatosan romlik. A piroklasztitok agyagosodásra való hajlama, alacsonyabb fokú repedezettsége miatt a lávakőzeteknél némileg rosszabb vízvezető tulajdonsággal rendelkeznek, ezért ezek a

felszín közelben egységesen külön vízföldtani kategóriát képeznek.

A felső-badeni–alsó-szarmata zempléni szigetvulkánok a kristályos alaphegység, vagy a Bodrogszerdahelynél fúrásból ismert triász karbonátok áttörésével kerültek a felszínre. A vizsgált területre két jelentősebb szigetvulkán, a bodrogszerdahelyi és a királyhelmei andezit rétegvulkán esik. A szigetvulkánok vízföldtani szempontból — a Zempléni-hegység fő tömegét alkotó repedezett vulkanitokhoz hasonlóan — rossz vízvezető képességűek. Felszínhez közeli mállott zónájuk, valamivel kedvezőbb vízvezető képességű.

A medenceterület alá benyúló vulkanitot badeni–pannóniai, a szigetvulkáni felépítmények jelentős részét szarmata–pannóniai üledékes takaró borítja. Az 1000 métert meghaladó medenceösszletben jelen kutatás szempontjából alsó vízzáró határként az alsó- és a felső-pannóniai üledékek határfelületét jelöltük ki.

Vízföldtani szempontból értékelve a felső-pannóniai rétegösszlet átlagosan közepes–rossz vízvezető képességű rétegek váltakozásából épül föl, amelyben a durvatörmelékes rétegek aránya és vastagsága felfelé kissé csökken. A fentiek alapján a felső-pannóniai összlet egy hidrosztratigráfiai egységnek tekintve horizontálisan közepes, vertikálisan rossz vízvezető egységként értékelhető.

A hegységi területek felé kivékonyodó, de a medenceterületeken 100–180 m vastagságot is elérő negyedidőszaki összlet laterálisan és vertikálisan is eltérő szemcseösszetételű sziliciklasztos üledékekből épül föl. A felszín közeli, néhány 10 méteres vastagságú összletben a terület fedett földtani térképe alapján az egyes törmelékes képződmények megbízhatóan lehatárolhatók, vízföldtani szempontból kielégítően kategorizálhatók. A negyedidőszaki képződmények vízvezető képessége a jó–közepes–rossz kategóriájú tartományt öleli föl.

A területen regionális, vagy szubregionális léptékben vízföldtani szempontból meghatározó szerkezetföldtani elem a modellezett tértartományban nem fordul elő, az alacsonyabb rendű, vízföldtanilag meghatározó tektonikai elemeket pedig diffúz hatótényezőként vettük figyelembe a regionális vízföldtani rendszer modellezésekor (hasadékos vulkanitok).

A modell leírása

A modellezési terület nagyságából, a modellezési feladat regionális jellegéből adódóan, és figyelembe véve a felhasznált Visual Modflow 4.2. (Waterloo Hydrogeologic Inc. 2006) szoftver lehetőségeit a modellterületen 250×250 méteres hálókiosztást alkalmaztunk.

A modellben vertikálisan három fő hidrosztratigráfiai szintet definiáltunk (9. táblázat). A negyedidőszaki összlet talajvíztartó rétegében (1. modellréteg) a földtani képződmények összevonását követően 9 db hidrosztratigráfiai egységet különítettünk el laterálisan (10. ábra), mely a modellben a Ronyva völgyében a kalibráció során környezetétől kissé eltérő paraméterrel definiált vízvezető kőzetek és a metamorfik meghatározását követően 11 db-ra módosult. Az ez alatti hidrosztratigráfiai egységeket, azaz a negyedidőszaki összlet alsóbb részét és a felső-pannóniai összletet a modellezés szempontjából technikailag előnyös vertikálisan arányos hálókiosztás érdekében további alrétegekre osztottuk. A modellben ezzel 7 db réteget határoztunk meg, azonban az azonos csoportba tartozó alrétegek szivárgás-hidraulikai paramétereit egyenként nem változtattuk, így a modell fő hidrosztratigráfiai egységeit tekintve vertikálisan háromosztatú maradt (11. ábra).

A modellezési terület határán és a felső-pannóniai hidrosztratigráfiai egység bázisán impermeábilis peremeket

9. táblázat. Hidrosztratigráfiai egységek és azok szivárgásitényező-értékei

Modellréteg	Hidrosztratigráfiai egység	Képződmény	K_{xy} [m/s] (laterális)	K_v [m/s] (vertikális)
1.	talajvíztartó kvarter üledékek, mállott felszíni, felszín közeli kristályos medencealjzat, neogén vulkanitok, piroklasztitok	agyag	1E-8	1E-8
		agyagos kőzetlisz	1E-7	1E-7
		lőszös homok	9E-6	9E-6
		finom-középszemcsés homok	5E-5	5E-5
		homok	5E-4	5E-4
		Lősz	1E-6	1E-6
		mészkö	5E-5	1E-5
		repedezett metamorf kőzet	3E-7	8E-7
		repedezett metamorf kőzet	1E-8	5E-8
		repedezett vulkanit	1E-8	5E-8
		tufa	1E-6	5E-7
2-3.	a kvarter alsó része és neogén vulkanitok	kvarter összlet	5E-4	5E-6
		neogén vulkanitok	8E-7	8E-8
4-7.	felsőpannóniai összlet és neogén vulkanitok	felsőpannóniai összlet	7E-4	1E-6
		neogén vulkanitok	5E-7	5E-8

10. táblázat. A modellben meghatározott párolgási zónák és azok adatai

Beszivárgási terület	Párolgás [mm/év]	Behatolási mélység [m]
Zempléni-hegység	20	1
Ronyva-völgy-Bodrogeköz-Rétköz	221	1,4
Hajdúság-Nyírség	5	1

határoztunk meg, mellyel a vizsgált medence önálló rendszerként vált értékelhetővé.

A modellezett területre eső elsődleges csapadék eredetű beszivárgást a felszín közeli földtani felépítés, valamint a területre hulló csapadék eloszlása alapján számítottuk ki. A terület összevont felszín közeli földtani képződményei az agyag (A), agyagos lösz (AL), homok (H), lösz (L), löszös homok (LH), mészkő (M), repedezett metamorf kőzetek (RM), repedezett vulkanitok (RV), tufák (T), mely kifejlődésekhez jellemző elsődleges potenciális beszivárgási százalékértéket rendeltünk (3. táblázat).

A modellezett területen 38 csapadékmérő állomás 23 éves (1980–2002) időszora állt rendelkezésünkre. Az idősorok alapján az évenkénti összes csapadék mennyiségekből átlagot számoltunk, majd átlagértékek alapján csapadékeloszlási térképet szerkesztettünk.

A továbbiakban elkészítettük az egyszerűsített földtani térkép és a csapadékeloszlási térkép közös fedvényterképét, mellyel az elsődleges beszivárgási zónák meghatározhatók-ká váltak (12. ábra).

A modellben a hatékony beszivárgás meghatározása érdekében három kiterjedt, azonos párolgási értékkel jellemzett területet különítettünk el (13. ábra) a fentiekben tárgyalt éghajlati jellemzők és Magyarország talajvízforgalmi térképe (TÓTH 1986) alapján. A három kiterjedt zóna a Zempléni-hegység, a Ronyva völgye – Bodrogeköz – Rétköz területe, valamint a Hajdúság–Nyírség vidéke. A három régióra jellemző éves felületi és felszín közeli párolgás értékét és a párolgás átlagos behatolási mélységét a 10. táblázat foglalja össze.

Az elsődleges beszivárgással jellemzett területeket és az evapotranspirációs zónákat a modellben fedvényként egymásra illesztettük, és ezzel határoztuk meg a hatékony beszivárgási területeket és a talajvízadó vízháztartását.

Megcsapoló (drain) típusú határ

Megcsapoló (drain) típusú határfeltételt a Zempléni-hegység területén, a modellezett terület északnyugati részén alkalmaztunk. A megcsapoló elemet a felszíni topográfia alatt 0,1 méterrel futó felületként határoztuk meg, és a megcsapolás mértékét befolyásoló vezetőképesség (conductance) értékét egységesen 50 m²/d-ben adtuk meg.

Folyó típusú határfeltételek

A modellezett területen négy jelentősebb vízfolyást (Tisza, Bodrog, Latorca, Ronyva) határoztunk meg folyó típusú határfeltételként. Az egyes vízszintregisztráló állomások modellben felhasznált vízszintadatait (2002. évi középvízszintek) az 11. táblázat foglalja össze. Az egyes állomások között a vízszintadatokat — a modell input menürendszerének segítségével — lineáris interpolációval határoztuk meg.

A Tisza, a Bodrog és a Latorca mederanyagának vezetőképességét (conductance, C) a folyók szélessége (W), az egyes cellákban elért hossza (L), a mederanyag vertikális szivárgási tényezője (K_v) szorzatának a mederanyag vastagságával (M) történő osztásával határoztuk meg: $C=(W \times L \times K_v)/M$, a Ronyva esetén viszont a kalibráció során meghatározott egységes értékkel definiáltuk. A vízfolyások mederanyag-ellenállás értékeit a 12. táblázat foglalja össze.

Termelő- és észlelő objektumok

A technikai modellterületre a nyers adatbázis összesen 898 db 1000 m³/nap hozamnál nagyobb vízkivételű víztermelő objektumot tartalmazott. A szűrt adatbázis további leválogatását egyrészt a kutatási modellhatár kiterjedése, másrészt a vizsgált térrész mélysége alapján végeztük el, így

11. táblázat. A modellben definiált vízfolyások vízszintadatai, 2002. évi középvízszintek alapján

Folyó	Település	Vízmerce nemzeti kódja	UTM X	UTM Y	Vízszint [mB]
Tisza	Vásárosnamény	1516	599654	5331149	102,43
Tisza	Záhony	1518	586736	5362763	97,77
Tisza	Dombrád	1520	568354	5343122	95,84
Tisza	Tiszabercel	1521	549251	5334797	94,94
Tisza	Tokaj	1719	530854	5329302	94,38
Latorca	Nagykapos	9410	577688	5372482	97,47
Latorca	Bodrogszerdahely	9670	555382	5360473	95,40
Bodrog	Felsőberecki	1724	551273	5356164	95,42
Bodrog	Sárospatak	1725	542603	5352075	95,03
Ronyva	Alsómihályi	9690	545294	5373550	122,61
Ronyva	Sátoraljaújhely	3059	548945	5362560	100,85

12. táblázat. A modellben definiált vízfolyások mederanyag-ellenállása

Vízfolyás	Mederanyag vezetőképessége [m ³ /d]	
	minimum	maximum
Tisza	55	242
Bodrog	50	258
Latorca	41	186
Ronyva	350	350

a modellterületen kívül eső, valamint a felső-pannóniai összlet aljzata alatt szűrőzött kutakat a továbbiakban nem vettük figyelembe. Az adatkezelési folyamat után a modellben 575 db vízkivételi objektumot definiáltunk.

A víztermelő objektumok jellegüket tekintve lokális vízellátást szolgáló ipari, vagy mezőgazdasági kutak és közösségek ivóvízellátását szolgáló vízbázisok termelőiküti. A Bodrogi víztestre telepített sérülékeny földtani környezetben lévő vízbázisok az alábbiak: Sátoraljaújhely, Kisvárd, Ibrány (Jásztelep), Kótaj-Nagyhalász, Tiszabезд, Paszab, Kemecse, Licse, Fényeslitke, Dombrád, Dombrád-Kistiszahát, Buj.

A víztermelések mintegy 90%-ban az 500 m³/d alatti értéktartományba esnek. Ezt az 500–1000 m³/nap értéktartomány közé eső víztermelések követik, 7%-ot kissé meghaladó gyakorisági értékkel. Az 1000 m³/nap hozamnál jelentősebb nagyságú víztermelések részaránya kevesebb, mint 3%.

A termelőkutak szűrőközepértéke –737,69–239,90 m Bf között szór. A kutak többsége a kvarter, valamint a felső-pannóniai összlet felső részén települő vízadókat termeli a felszín közeli rétegektől –150 m Bf szintig. További néhány kút szűrőjét a felső-pannóniai összlet alsó szakaszán alakították ki –150 – –737 m Bf szint között.

A termelő objektumok esetén bemutatott adatkezelési eljárások után 122 db vízszintfigyelő kutatadtunk be a modellbe. A kalibrációs eljárás során öt db kút (1609, 2611, 4018, 4163, 4338) vízszintadatait, az azokhoz közvetlen közeli kutak adataitól való markáns eltérés miatt nem vettünk figyelembe, így a modellben ténylegesen felhasznált vízszintfigyelő objektumok száma összesen 117 db. A figyelő objektumok szűrőközepértéke 68,70–147,61 m Bf között szór.

A modell futtatása

A modellt két permanens állapotra futtattuk. A nyugalmi állapotra történő kalibrálás után a víztermelési állapotot szimuláltuk. A modell futtatási paraméterei:

— a számításokhoz a Slice-Successive Over-Relaxation (SOR) algoritmust használtuk fel, az iterációk megengedett maximális száma 1000, az úgynevezett „Acceleration factor” 0,1, a vízszintváltozások konvergencia határa 0,3 m;

— a termelési viszonyokat figyelembe vevő, második-ként lefutott modellben az „Acceleration factor”-t 0,05-re állítottuk;

— a kezdeti beállítás szerint a rétegek lehetnek fedettek, vagy fedetlenek, szükség esetén változó áteresztőképesség-

gel, ezt a megoldást a modell viszonylag jelentős vertikális kiterjedése miatt alkalmaztuk, hiszen több felszín közeli, előre meg nem határozható számú réteg egyes zónája leürülhetett, ugyanakkor ez a rétegtípus az alsóbb, nem leürülő rétegekre is alkalmazható;

— a cellák újranedvesedése nem engedélyezett.

Kalibráció

A kalibrálásra felhasznált 117 db jó területi eloszlású figyelőkút mért és számított nyugalmi vízszintértékeinek kapcsolata alapján megállapítható, hogy a mért és számított vízszintértékek igen jó egyezést mutatnak, melynek lényegesebb statisztikai mutatói az alábbiakban foglalhatók össze:

- maximális eltérés: 5,93 m;
- abszolút középhiba: 1,153 m;
- közelítés standard hibája: 0,147 m;
- eltérések normalizált négyzetösszege: 2,672%;
- korrelációs koefficiens: 0,995.

Áramlási tér és a vízháztartás elemzése a modellezett eredmények alapján

A regionális áramlási tér Bodrogi régiójában a felszín alatti víz természetes körülmények között, permanens feltételek mellett kialakuló hidraulikus potenciáeloszlása a permanens termelési állapot során kialakuló hidraulikus potenciáeloszlással közel azonos. A regionális felszín alatti vízármlási pályák a peremek felől a medence központi régiója felé irányulnak (14. ábra).

A természetes állapotra számított vízmérleg eredményeit a 13. táblázat foglalja össze. A vízmérlegelemzés alapján a vizsgált terület természetes permanens hidrogeológiai viszonyok mellett hidraulikailag egyensúlyban van. A betáplálás fő komponense a csapadék eredetű beszivárgás (94%), de a folyómedrek felső szakaszaihoz kapcsolódó, allúviumot tápláló beszivárgás is megjelenik (6%), abszolút értékét tekintve jelentős súllyal. A kilépő vízmennyiségben a párolgás (43%) és a hegyvidéki területeken a völgyek által szabályozott megcsapolás (41%), drénhatás jelentős értékű és közel azonos súlyt képvisel. A folyómedrek a felszín alatti víznek a rendszerből történő kivonásakor is jelentős szerepet játszanak, a távozó vízmennyiség 16%-a rajtuk

13. táblázat. Vízmérleg-komponensek és azok adatai a medence természetes hidrogeológiai rendszerének permanens állapotú vizsgálatok

Vízmérleg komponens	Bemenő vízmennyiség [m ³ /d]	Kilépő vízmennyiség [m ³ /d]
Beszivárgás	623 360	–
Párolgás	–	286 600
Folyómedrek vízforgalma	38 284	100 520
Hegyvidéki megcsapolás	–	274 510
Összesen	661 644	661 630
Különbség		14
Eltérés [%]		~0

keresztül medercsatorna elvezetés útján távozik a vizsgált medencéből.

Modellezési eredmények összefoglalása

A vízgyűjtő medence részletesen feldolgozott hidrogeológiai környezetének ismeretében, valamint az az alapján felépített permanens numerikus hidraulikai modell által feltárt felszín alatti vízáramlási tér ismeretében a felszín alatti vízáramlási tér alapján összefoglalásként megállapítható, hogy:

— A vízgyűjtő medence vizsgált tértartományában gravitáció által vezérelt permanens felszín alatti vízáramlási rendszerek alakultak ki.

— A fő beáramlási területek a Nyírség és a Hajdúság régiója, ahonnan a hatékonyan beszivárgó, a felszín alatti vizeket tápláló víz regionális mélyáramlások, illetve köztes vízáramrendszerek révén a medence központi régiója felé áramlik.

— A beszivárgás szempontjából jelentős hatású a Zempléni-hegység területe is, azonban itt számottevő a csapadékvíz közvetlen felszíni levezetése, továbbá a mélyen bevágódó völgyek által vonal mentén, vagy a számos kisebb, a modellben külön nem definiált források révén pontszerűen megcsapolt felszín alatti vizek levezetése.

— A felszín alatt a mállott, illetve repedezett vulkanitban, valamint a patakok allúviumában a hegyláb felé elszivárgó és ott a medenceösszletbe átadódó felszín alatti víz egy része medencegeometriai okokból viszonylag hamar, a Bodrog-völgyében, valamint a Bodrogköz nyugati sávjában vonal mentén, illetve felületen keresztül megcsapolódik. Innen a még felszín alatti rendszerben maradt víz számottevő hányada — kis hajtóerő mellett — délkelet felé, a medence hidraulikai minimum zónája felé áramlik, ahol a kelet, délkelet és dél felől érkező felszín alatti vízzel együtt kiterjedt területen megcsapolódik.

— A regionális megcsapolódási terület a Bodrogköz és a Rétköz régiója, ahol a medencegeometriai okokból (nagy kiterjedésű, de viszonylag sekély medence) az intenzív párolgással történő kiterjedt felszíni megcsapolás dominál, míg a vonal menti, Tisza által történő megcsapolás alárendeltebb.

— A vizsgálatunk szempontjából kiemelt jelentőségű Bodrogközi terület medenceközponti helyzete révén természetes állapotában és víztermeléssel terhelt vízgyűjtő medence esetén is kiváló vízellátottságú, amit az állandóan felszín közeli talajvíztükör, a vízenyős területek jelenléte és a felszín alatti vizek által táplált állandóan magas értékű felületi párolgás egyaránt jelez.

— Felszín alatti víztermeléssel összefüggő kedvezőtlen hatások, folyamatok (vizes ökoszisztémák életterének zsugorodása, megszűnése; kitermelhető vízkészlet csökkenése) a Bodrogközi régiót jelen környezeti és termelési állapotok mellett nem érintik.

— A Bodrogközi víztest a modellezés eredményei alapján a magyar–szlovák határon átnyúlik, a hidraulikai modellezés alapján javasolt határai a következő topográfiai elemekhez igazítva adhatók meg:

— délen, délkeleten és keleten a Tisza vonala Tokajtól Záhonyig;

— keleten Záhonytól rövid szakaszon a szlovák–ukrán határ a Latoricáig;

— északon a Latorca;

— északnyugaton és nyugaton a Bodrog.

Konklúzió

Az e tanulmányban bemutatott, három mintaterületen elvégzett numerikus modellezés eredményei igazolták a határokon átnyúló hidrogeológiai rendszerek komplex kezelésének szükségességét. Az ilyen bilaterális, vagy esetenként multilaterális együttműködési keretek biztosíthatják a vizsgált rendszerek geometriájának és hidrogeológiai környezetük különböző típusú adatmezőinek teljes körű feldolgozását az adott ismertségi szint mellett. Az így készülő numerikus modellek a regionális vízgyűjtő léptékű értékelésen túl alapját képezhetik az adott rendszerből különböző szempontok szerint kiragadott területrészek részletesebb feldolgozásának, továbbá a harmonizált adatbázis-szerkezetnek köszönhetően egyúttal alkalmasak a több országban folyamatosan bővülő adatok beépítésére is.