

# Construction and application of a geological 3D model at the Bábaapáti (Üveghuta) Site

GÁBOR TURCZI, GÁSPÁR ALBERT, GERGELY HAVAS and ANDRÁS TISZA

Geological Institute of Hungary, H-1143 Budapest, Stefánia út



**Keywords:** data handling, data processing, digital data, digital terrain models, geologic maps, Hungary, mathematical methods, Mórág Block, South-eastern Transdanubia, three-dimensional models

## Abstract

The objective of setting up a model is to create a system reflecting reality concerning a certain aspect which facilitates the creation of experiences and gets answers to specific questions. The geological 3D model projects the geological setting of a certain part of the Earth's crust emphasising the features of rock units. Hierarchically, data put in the model can be subdivided into primary and derived data. The primary data of the model include the terrain relief, outcrops of rocks and drilling data. Derived data are created by them through estimation procedures. Manually compiled subsurface rock boundaries and surfaces are assigned to data regarded as having secondary priority.

The 3D model elaborated during the investigation was aimed essentially at drawing up a picture about the geological setting of the area as well as supporting hydrogeological modelling. The fulfilment of these tasks needed the definition of the following basic surfaces: terrain relief, relief of basement rocks, and relief of the Quaternary bottom. The application of basic surfaces and the subsurface map promoted the generation of the derived surface geological map. Apart from the data for the fracture zones and rock boundaries, some derived data (*e.g.* inferred fault planes) based on the results of different investigation methods were also placed in the model. This made it possible to determine the hierarchy of the fracture zones and also to further subdivide basement formations to rocks of inferred monzonite and monzogranite composition.



## Introduction

The objective of setting up a model is to create a system reflecting reality concerning a certain aspect which facilitates the creation of experiences and gets answers to specific questions. The way in which the model displays reality is not the same as reality itself but it makes it possible to simulate reality. This demonstration method is based essentially on a mathematical approach supported by data which can be observed. The geological 3D model projects the geological setting of a certain part of the Earth's crust emphasising the features of rock units. The basis of this projection may be a dataset characterising the examined rock unit in spatially scattered (surface or subsurface) points. The 2D final product of such a projection may be a map or geological profile. They are capable of reflecting several dimensions including time or the third dimension of space; they cannot, however, replace an expressive 3D model with an enormous storage capacity.

With regard to a dynamic model, it should definitively be able to receive and process new data and to display the related modification in the output side. If these conditions are not met is merely a static one. Both the dynamism and expressiveness of a model depend first of all on the applied development software.

Accordingly, the model is made up of two basic features: the operating medium (software) and the input database (basic data). Instead of corresponding to an exactly defined database and format, the notion of a "3D geological model" is like a strong generalisation which is expected to provide continuous information on a specific spatial segment; this segment can be interpreted along certain planes and surfaces. Whatever model is used, its basic task is to demonstrate the geological structure of a spatial unit. One of the several methods available for the solution of this task is a structure made up of voxels. The latter can be interpreted as a set of essentially homogeneous prisms which are fitted tightly to each other and which can carry any kind of information (*e.g.* about rock

and its features). The accuracy depends on the size of the voxels — *i.e.* of the model's resolution. The fact that the information referring to the observation points is not saved in the model is a handicap of this method.

Another approach is to define the spatial extent, surface and thickness of different rock units. This method is based on the application of distortion-free, accurately georeferenced information (map polygons, drilling data) gained from primary observation points. While the operation principle of the first method is analogous with the 2D raster-based technique, the second one is based on the technology of 2D vector-based display.

The database of the geological model is based on borehole data as well as on surface and deep subsurface maps and profiles. Its realisation is the function of the application software.

In the following part of the paper the geological 3D model set up during the ground-based geological investigation of the Bábaapáti (Üveghuta) Site is scrutinised together with related derived maps.

The 3D model elaborated during the investigation was aimed essentially at drawing up a picture about the geological setting of the area as well as supporting hydrogeological modelling. The fulfilment of these tasks needed the definition of the following base surfaces:

- terrain relief,
- relief of basement rocks,
- relief of the Quaternary bottom.

Delimitation of rock units by faults and separation of basement rocks with a definition of their spatial extent present a complicated task. The afore-mentioned basic surfaces provide the background to its solution. After an overview of the model's data structure the process of creating the basic surfaces are demonstrated, and then the creation of thematic topologies are presented. Although the analysis of the model and the interpretation of fracture zones are closely associated with the mentioned above procedures the latter were performed in an independent modelling environment.

### Data structure of the model

Elaboration of the 3D model not only provided better understanding of geological structures but also enabled synthesising of the data from different research areas. Consequently, the model had a data storage aspect as well. This means that not only the  $x$ ,  $y$  coordinates of the analysed and processed objects, but also their  $z$  altitudes were defined in geometric space instead of storing the latter as descriptive attributes. The 3D model space corresponds to the EOJ (Uniform National Projection) geodetic space.

Owing to the diversity of methods used during the investigation, input data were given in different formats. The same process applied to output data as well. In order to ensure uniform data processing within the modelling environment, both the source and the conditions of the creation of the data were classified.

Hierarchically, data put in the model could be subdivided into primary and derived data. The primary data of the model included the terrain relief, outcrops of rocks and drilling data. Derived data were created from them using estimation procedures. The resulting points could be overwritten by data of higher priority (*e.g.* drilling data; ALBERT 2003a). Manually compiled rock boundaries and surfaces (BALLA et al. 2003) were classified as derived data — *i.e.* data of secondary priority.

With this model, for data processing geometry is of crucial importance. The continuity of the model was ensured by surfaces based on point-type or linear information. Processing was performed by 3D CAD and GIS tools.

### General workflow of surface generation

Generation of surfaces and the knowledge of their data structure model are indispensable for understanding the analyses which can feasibly be expected of the model and also the limits of the model. A single surface models the actual or a specific palaeogeographic relief.

In the model the workflow of surface generation is presented by processing the terrain relief. The fundamental prerequisite of relief generation involves loading the typical points of relief elements into a 3D system (provided their 3D coordinates are available). They can be typed in from a table or done automatically by data input from positioning tools (*e.g.* GPS, survey station). Another frequent method also used in the work requires the digitising of contour lines and altitude datum points from calibrated map sheets, or the adjustment of the digitised contour lines to the corresponding altitudes. The prepared 3D contour lines had to be imported in a 3D database. Apart from the 3D coordinates of the contour line vertexes, it also included the  $x$ ,  $y$ ,  $z$  coordinates of some other typical relief elements affecting interpolation (*e.g.* base points, peaks, faults, fracture lines, trenches, planar surfaces). The correct qualification of input data was of utmost importance at this stage because during interpolation the datasets describing different relief patterns were processed in different way. The complete workflow of processing is represented in Figure 1.

There are two methods for storing and displaying surfaces, however. However, the corresponding data format essentially defines the possibilities of further processing.

In the *TIN model* (TIN — Triangulated Irregular Network), by interpreting the vertex points of contour lines (and other input points of defined altitude) as the apexes of spatial triangles, the programme generates an irregular spatial network with geometry approximating the real surface. In the TIN model the altitude of any points can be determined by defining the intersection of the triangle, including the point and the straight line drawn at a right angle from the point. The advantage of the TIN model is that it stores all loaded data.

The *grid model* is a network made up of regular, spatially distributed rows and columns characterised by spe-

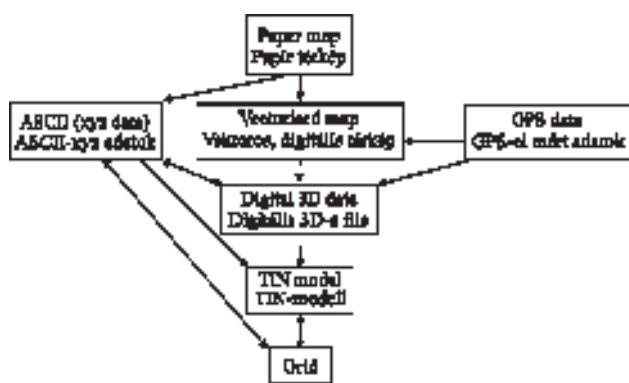


Figure 1. Workflow of surface generation  
1. ábra. A felületmodell előállításának folyamata

cific extent (dimension) and orientation. Its extent depends on the number of rows and columns and their size. It is oriented by georeferencing one of its priority points (*e.g.* the upper left corner) in a specific coordinate system and, occasionally, by its rotation angle. With the coordinate definition of the priority point and its size parameters, all the points of the grid become oriented. In the 3D grid model, intersections of rows and columns can be generated through the interpolation of input data. These input data correspond to the irregularly scattered points of the TIN model. The distance between rows and columns determines the model's resolution.

One of the assets of the grid model is that it provides an opportunity to apply arithmetic operations between the grid points of overlapping surfaces of identical resolution (*e.g.* addition, subtraction), thus facilitating the generation of derived surfaces. Constants can also be specified in the calculations with grids and the execution of operations can be restricted by conditions. The compilation of cross sections and limit surfaces also pertain to the operations through surface models that are supported to various extents by different softwares.

The thoroughly prepared grid model can serve as a basis for compiling contour line maps of cartographic quality or for generating continuous shaded surfaces displayed by different methods.

Summarising, it can be stated that the first step of model generation is the classification of data coming from diverse sources and their input in the processing environment. It is followed by the generating TIN and finally grid models; the latter support the arithmetic operations between the surfaces.

### Generation of basic surfaces

Terrain relief is the uppermost delimitation of the geological 3D model. Simultaneously, it is the primary surface that can be displayed with most accuracy. It provides important source data for the hydrogeological model and for the analysis of fracture zones, and also for the geological map. The latter can be compiled upon the

surface and basement relief of basement rocks and Quaternary beds.

It was started with the raw, 3D digitised contour outlines of Fömi's (Institute of Geodesy, Cartography and Remote Sensing) 1:10,000-scale topographic maps. With these maps the spacing between contour lines represents 2.5 m in real life. Points resulting from the cross section survey of valleys and related derived detailed contour lines (0.5 m spacing) were also available. The accuracy of the original contour lines is  $\pm 83$  cm, whereas in the surveyed valleys it was improved to  $\pm 17$  cm. In the first phase of the work the two models were merged. Two problems were faced, namely the different resolution of the two contour lines and the generalised pattern of contour lines adjusted to the 1:10,000 scale.

In the next stage the accuracy of the surroundings of different terrain features were enhanced. Since they (*i.e.* escarpments, gullies, road cuts, embankments, *etc.*) were not indicated in the contour lines given by Fömi, they also had to be added to the model (Figure 2). In order to improve accuracy they were also represented by contour lines on the basis of the 1:10,000-scale topographic map. Although the softwares would have provided an opportunity for direct input of the contour lines of terrain features, if this method had been used the necessary accuracy expected at 2 m resolution could not have been achieved.

To achieve further improvement in accuracy, the contour lines of valley bottoms were also digitised. This made it possible to avoid non-existent "holes" in valley bottoms. These "holes" occasionally appeared in the terrain model during interpolation. Due to the consideration of surfaces covered with water as uniform, planar surfaces they had to be excluded from interpolation; therefore their contour lines were also put in the model.

For faster processing the area was subdivided into several parts. Each significant work phase was terminated by checking in order to pick up drawing errors, contour lines put on false altitude, line breaks, *etc.* Moreover, during the workflow the separately processed areas had to be adjusted to each other as well.

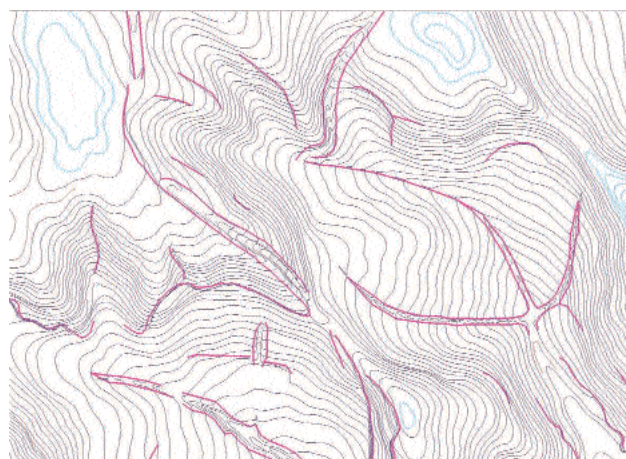


Figure 2. Improvement of the accuracy of contour lines  
2. ábra. A szintvonalrajz pontosítása

In the final phase of processing a TIN model was generated from the corrected contour lines which served as the basis for constructing a 2×2 m resolution grid through linear interpolation — *i.e.* the grid model. This resolution was determined by the fact that narrow valleys, gullies, road cuts, *etc.* disappear partially or completely from the model. A higher resolution would have demanded a substantially longer processing time given that the amount of necessary calculations would concomitantly have grown exponentially. The area represented by the model is 4501×4001 = 18,008,501 pixels, corresponding to 72 km<sup>2</sup>.

Concerning derived surfaces, the first one prepared was the alluvium model. It was based on the thickness map compiled by A. Dudko upon the basis of drilling data. The contour line indicating 0 m thickness corresponds simultaneously to the boundary of the alluvium's extent. The related digital processing resulted in a contour line map with spacing of 1 m. This was used as input for the thickness model firstly in TIN and then in a grid of 2×2 m resolution. The basement model of the alluvium was generated by subtracting the thickness model from the terrain relief model.

The source of generating the basement relief was the palaeogeographic relief compiled by Z. Balla with 10 m contour line spacing. Following the scanning and digitising of the contour line map the density of the contour line spacing had to be enhanced to 2.5 m in order to acquire a smoother surface. The checking of basic data proceeded in the same way as in the terrain relief model. A TIN and then a grid model was generated from the 3D linework. This overlapped with the terrain relief model and had the same resolution. The intersection line of the basement relief surface and the alluvium basement model with the terrain relief model manifested the boundary of the exposition of the basement (Figure 3). Occasionally it deviated from the already known and fixed outcrop boundaries. Deviations were corrected by local modification of the initial contour



Figure 3. Intersection line of the palaeogeographic relief of the basement and the ground surface

3. ábra. Az alaphegység ősföldrajzi domborzata és a felszín metszésvonala

lines. This resulted in the lifting or sinking of the theoretical (palaeogeographic) surface. A new grid model was created using the new contour lines. The iteration procedure was carried on until the error had become less than ±80 cm. The relief model of the basement was generated by the algorithm as follows:

```

if
    AHO ≥ DTM
then
    AHF = DTM – ALV,
if
    AHO < DTM
then
    AHF = AHO,

```

where

DTM — terrain relief,

AHO — palaeogeographic relief of the basement,

AHF — basement relief,

ALV — thickness of the alluvium (beyond the boundary of extension the model invariably had a 0 value).

The basement surface of the Quaternary beds is made up of 3 units and these were appropriate for modelling: the extension of Miocene beds directly overlying the basement, that of Pannonian beds, and that of Quaternary beds. The work was started with the extent and thickness map of Miocene and Pannonian sediments, with contour line spacing of 10 m. Similarly to the basement surface the density of the contour lines had to be enhanced and the same checking procedure was applied as well. The Miocene and Pannonian TIN and grid models were generated one by one since the two sequences were deposited independently of each other on the basement. The theoretical basement model of the Quaternary beds was brought about through the addition of the resulting thickness and the theoretical basement surface model.

The associated algorithm is as follows:

```

NFO = AHO + MPV,
if
    NFO ≥ DTM
then
    NFF = DTM – ALV,
if
    NFO < DTM
then
    NFF = NFO,

```

where

MPV — thickness of the Miocene and Pannonian sequences, respectively,

NFO — Quaternary bottom relief along the palaeogeographic relief of the basement,

NFF — Quaternary bottom relief situated below the palaeogeographic relief of the basement.

Cartographic quality contour lines were generated from each surface applying 10 m contour line spacing. The respective surface expositions of rock boundaries were also delineated on the maps.

### Compilation of the surface geological map

According to the features outlined above, independent, spatially complementary basic surfaces presented themselves: terrain relief (DTM), basement relief (AHF) and the Quaternary bottom relief (NFF). Surfaces are the fundamental building components of the model. Though the main objective of model generation is the analysis of the hydrogeological setting and related fracture zones it is still appropriate for generating derived geological maps. It needs, however, the harmonised application of 3D and GIS tools.

In this case the theatre of 3D operations is the raw- and column-based regular grid. Processing is based on a raster technique. The required final output is a vector-based linework appropriate for GIS processing, including contour lines and area boundary features. Conversions are applied between raster and vector data formats.

The theatre of GIS operations is the topology. It is a specific data format of digital maps in which graphic objects are spatially arranged and, beside the usual set operators, some other “spatial” operators can also be deployed (TURCZI 2001). The latter are expressions of spatial definition (*e.g.* parts of A-attributed map elements can be found which touch and overlap with, or even contain B-attributed map elements, *etc.*). Anyway, set operations can be applied on the graphic objects that are considered as the building components of any topology. These operations are called filtering or, more commonly, topological queries. They can be performed by using commands of predefined syntax and they result in another topologically arranged thematic linework or map. Another significant feature of topology is that overlapping themes mutually inherit the attributes of one another (*e.g.* if the A-attributed sequence is crossed by a B-attributed fault, the fault also becomes A-attributed — namely, it acquires the attribute of the sequence it crosses).

In the following passage a presentation is given of the workflow which harmonised the assets of 3D and GIS tools used for the compilation of the geological map from raw source data.

Firstly, the exposition zones of the geological sequences were generated in a 3D environment through operations between the present terrain relief and the palaeogeographic surfaces.

The line of exposition and wedging out of the basement (AHK), as well as that of the wedging out of the Quaternary bottom (NFK) were examined. These can be generated by the following operations between 3D surfaces:

$$\text{DTM} - \text{AHF} \rightarrow \text{AHK},$$

$$\text{DTM} - \text{NFF} \rightarrow \text{NFK}.$$

The intersection of terrain relief and palaeogeographic surfaces yields a 3D curve. Its top view projection composes closed curves — *i.e.* area features. If the contour of the extent of alluvium (ALK) is also considered, the three areas embedded in one another designate the respective

surface extents of the Quaternary, Pannonian and Miocene sequences and basement rocks shown on the geological map.

In the second stage the surface geological map was produced by means of GIS tools. Different sequences on the surface of the basement, and the bottom of the Quaternary beds were delimited by Z. Balla using drilling data. The basis of GIS processing is the building of a complex topology, in this case made up of the following themes:

— subsurface image of the basement (AMK) — rock bodies delimited as area features and dykes as linear features,

— subsurface image of the Quaternary bottom (NMK) — rock bodies delimited as area features,

— exposition line of the basement (AHK) — closed areas,

— exposition line of the Quaternary bottom (NFK) — closed areas,

— extension boundary of the alluvium (ALK) — closed areas.

Accordingly, the topology is made up of five area themes and one line. Operations applied on the topology were as follows (Figure 4):

The union of the exposition of the basement and the Quaternary bottom, as well as the extent of the alluvium, yields the extent of Quaternary beds (Q), and simultaneously it also generates the area where Quaternary deposits are missing (NQ):

$$\text{AHK} + \text{NFK} + \text{ALK} \rightarrow \text{Q/NQ}.$$

The extent of the Pannonian beds (NFE) can be generated as the difference between the area without Quaternary deposits and the sum of the surface extent of alluvium and basement rocks:

$$\text{NQ} - (\text{AHK} + \text{ALK}) \rightarrow \text{NFE}.$$

The surface extent of the basement rocks (AHE) can be constructed as the difference between the area without Quaternary deposits and the sum of the surface extent of the alluvium and the Quaternary bottom.

$$\text{NQ} - (\text{NFK} + \text{ALK}) \rightarrow \text{AHE}.$$

The surface classification of basement rocks (AFE) is a joint part of the subsurface image of the basement and its surface extent. These map items can be processed by means of a spatial operator:

$$\text{AHE where it "CONTAINS" AMK} \rightarrow \text{AFE}.$$

Comparison of the results with the observation map reveals the errors of the model — *i.e.* the contradictions between the information inferred from field observations and drilling profiles on the one hand, and the compiled map on the other.

The 3D surface models were generated by GIS applications using Intergraph technology.

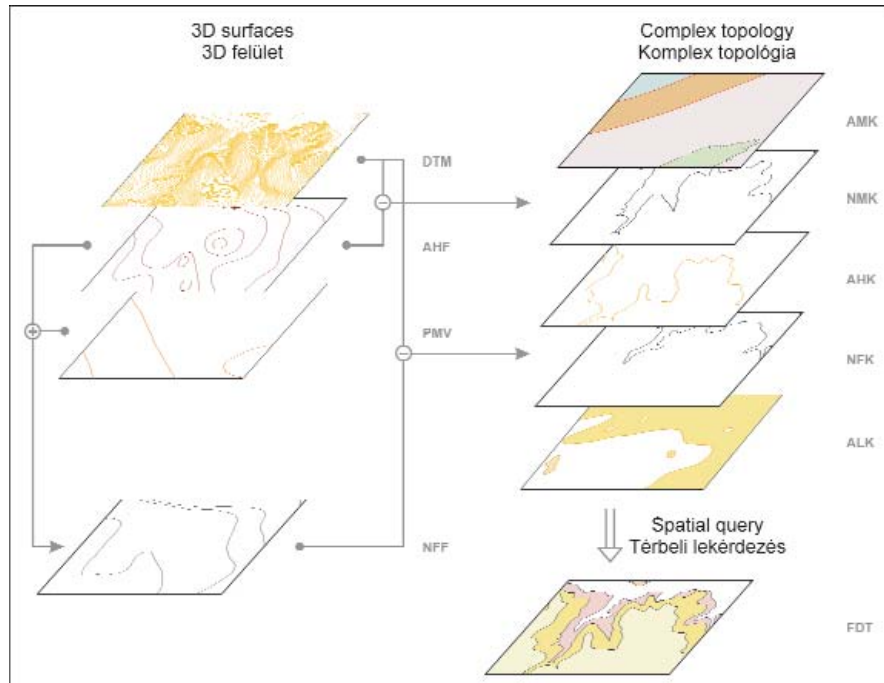


Figure 4. Application of 3D and GIS

4. ábra. 3D és GIS alkalmazása

### Model analysis, analysis of fracture zones

With the progress of investigation, modelled geological objects should follow the changes of the database (which accumulate in volume) in order to use the objects in the generation of a preliminary geological picture. The resulting conclusions affect the model itself. Model analysis can thus be described as a multistage process in which the data of the model should definitively be kept up-to-date in each phase. In the phase of model analysis the basic surfaces generated by the afore-mentioned arithmetic operations are already stored in the database and on demand they can be displayed in any area (Figure 5), or they can be represented in the automatically-generated profiles with a zigzagging trace.

Apart from the high-priority data of fracture zones and rock boundaries recognised in boreholes (between monzogranite and monzonite), some derived data (e.g. inferred fault planes), based on the results of different investigation methods, were also included in the model (BALLA et al. 2003).

Simplified geological sequences of some 176 boreholes (including inclined holes) were used as inputs for the model with their coordinates true to scale. As a result of generalisation three types of sequences were distinguished: monzogranitoid, monzonitoid and sedimentary sequences. The data of detailed borehole profiles were attached as attributes to the appropriate points of the model space.

Since it was rather difficult to define the orientation of fracture zones observed in boreholes, their modelling was

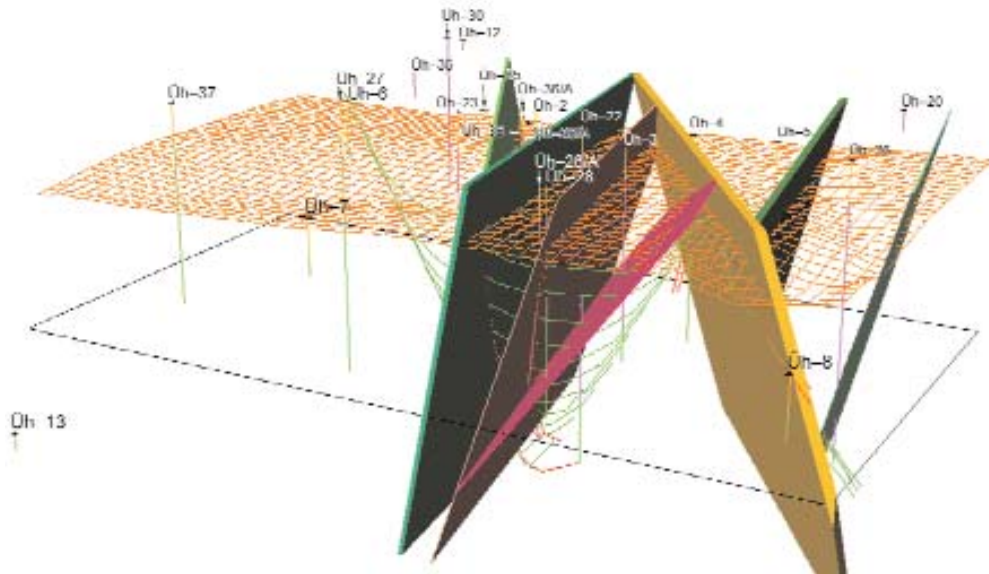
based on secondary information, like hydrogeological data. Single-fracture models (planes) were fixed to the observation points of borehole profiles and they could be assigned to three types according to their creation method:

- planes definable upon one observation point with specified dip and azimuth;
- planes definable upon two observation points with specified dip and dip orientation;
- planes defined upon three observation points.

The thickness of fracture zones was determined by the average of the observed values in boreholes. Inferred fracture zones designated on the basis of indirect information were put in the model space in the same way but their thickness was restricted to 1 m.

On the basis of the preliminary geological interpretation, the parameters of fracture zones had to be modified in several cases. These values were fixed in tables and then added to the model. By changing the values, the parameters of the object characterising the zone also changed. The measure and nature of the changes were determined by examining the visual interpretation of the model.

As a next step the hierarchy of the fracture zones was determined. It was followed by further subdivision of the basement to rocks of monzonite and monzogranite composition. In spite of the considerably dense drilling network, rock boundaries were delineated manually since purely arithmetic models would have yielded misleading results due to the multitude of fracture zones cross-cutting the region. The preliminary geological interpretation deriving from the model constituted the initial basis for delimiting the sequence's boundary surfaces. Such a subdivision of inhomogeneous rock bodies requires complex structural geological



**Figure 5.** The model of the fracture zones and the granite complex after ALBERT (2003a)  
orange grid = granite surface, green contour lines = the boundary surface between the monzonite and monzogranite; in the columns of the boreholes: green = monzonite, purple = monzogranite, yellow = loess. Northwest is left

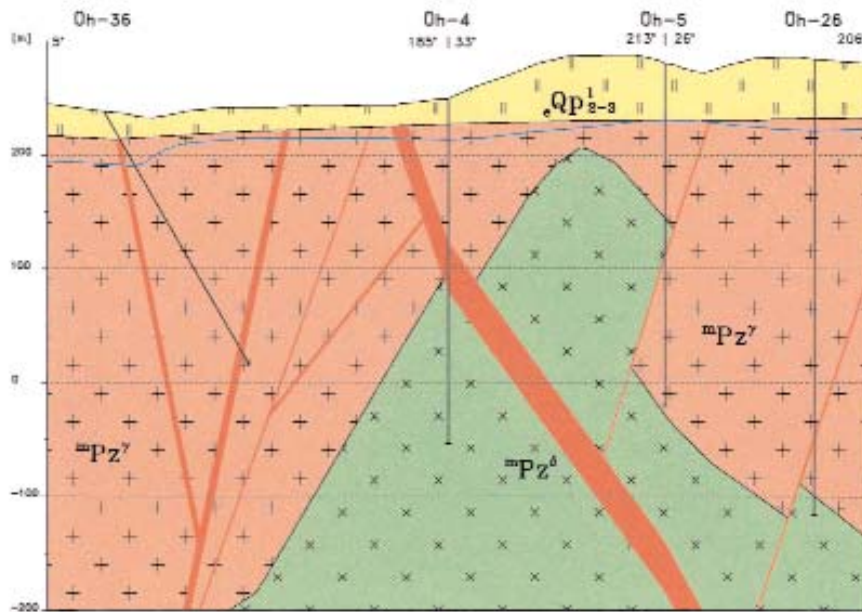
**5. ábra.** A töréses övek és az alaphegység felszínének modellje ALBERT (2003a) szerint  
narancssárga rács = gránitfelszín, zöld körvonalak = a monzogranit és a monzonit határfelülete; a fúrások oszlopainak színei: zöld = monzonit, lila = monzogranit, sárga = lösz. Északnyugat az ábra bal oldala felé van

knowledge that can only be asserted if the expert conducting the study has the opportunity to carry out a spatial examination of the 3D model.

An important aspect of the selection of the software environment for model analysis was the ability to move with ease in the model space, and the chance to compile the objects from any selected viewpoint. The need for fast delivery of the data of preliminary analysis to the users (*i.e.* hydrogeologists, geo-

physicists and other experts) in the required format was also considered. In the majority of cases output data were ASCII format AutoCAD exchange files (dxf). However, quite frequently, printed, true-to-scale lateral geological sections and geological profiles of a zigzagging trace line (Figure 6) were submitted to the users (BALLA et al. 2003).

The selected development software (Autodesk Land Desktop 3) provided an opportunity for the interactive com-



**Figure 6.** Vertical section of the model after ALBERT (2003b)  
<sup>m</sup>Pz<sup>γ</sup> (pink) = monzogranite; <sup>m</sup>Pz<sup>δ</sup> (green) = monzonite; eQp<sup>1</sup><sub>2-3</sub> (yellow) = loess; red = fracture zones. North is left

**6. ábra.** A modell függőleges szelvénye ALBERT (2003b) szerint  
<sup>m</sup>Pz<sup>γ</sup> (rózsaszín) = monzogranit; <sup>m</sup>Pz<sup>δ</sup> (zöld) = monzonit; eQp<sup>1</sup><sub>2-3</sub> (sárga) = lösz; vörös = töréses zónák. Észak bal oldalon

pilation of the surfaces to be modelled and to their modification; furthermore, for the users it facilitated the optional rotation of the 3D model as well as the modification of the representation and “husking” of the surfaces according to their needs. The possibility of defining the trace line of the profiles and block sections to suit the users’ requirements promoted better knowledge of the region’s geological setting. Optional selection of the viewpoint as well as the free movement in the model space substantially simplified compilation tasks in the 3D geodetic space. The resolution of the model is a user-specified parameter but it should match reasonably the accuracy of the input data — in this case to the order of mm (ALBERT 2003a).

It is thus clear that data input and modelling of the surface and subsurface sequences of the approximately 72 km<sup>2</sup> area are inseparable, parallel processes. Preliminary analysis of the model under construction proceeded while being simultaneously supported by designated block sections, together with profiles of an optionally oriented trace line and horizontal geological sections assigned at specific altitudes. Modelled sur-

faces and fractures could be studied and occasionally modified due to the dynamics of the 3D model and its flexible structure.

### Summary

In this study the objective, the data structure and features of a geological 3D model have been outlined. It was shown that new derived information can be acquired by using basic and interpreted data. Though the task was realised using specific software, the application of 3D CAD tools and topology-based GIS has been outlined in general terms. It is important to note that the constructed model supports interactive and visual work that cannot be, or can only be performed with great effort by using traditional techniques. The model integrates various map-based and tabular data. The checking of elements making up the model and designed to eliminate detectable contradictions can also be performed in this process. The inclusion of derived data contributes to the development of the model.

### References – Irodalom

- ALBERT, G. 2003a: Modelling of subsurface geological structures on a future disposal site of low- and intermediate-level radioactive wastes. — *European Geologist, Journal of the European Federation of Geologists* 16, pp. 23–26.
- ALBERT G. 2003b: A telephely földtani modellje (in Hungarian: Geological model of the site). — In: BALLA Z. et al. 2003, X. függelék, 4.3 fejezet (Annex X., Chapter 4.3), pp. 13–19.
- BALLA Z., ALBERT G., CHIKÁN G., DUDKO A., FODOR L., FORIÁN-SZABÓ M., FÖLDVÁRI M., GYALOG L., HAVAS G., HORVÁTH I., JÁMBOR Á., KAISER M., KOLOSZÁR L., KOROKNAI B., KOVÁCS-PÁLFFY P., MAROS GY., MARS I., PALOTÁS K., PEREGI ZS., RÁLISCH L.-NÉ, ROTÁRNÉ SZALKAI Á., SZŐCS T., TÓTH GY., TURCZI G., PRÓNAY ZS., VÉRTESEY L., ZILAHY-SEBESS L., GALSA A., SZONGOTH G., MEZŐ GY., MOLNÁR P., SZÉKELY F., HÁMOS G., SZÜCS I., TURGER Z., BALOGH J., JAKAB G., SZALAI Z. 2003: Az atomerőművi kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére irányuló program. A felszíni földtani kutatás zárójelentése, Bataapáti (Üveghuta), 2002–2003 [in Hungarian: Program of the final disposal of low- and intermediate-level radioactive waste. Final report of the ground-based geological exploration, Bataapáti (Üveghuta), 2002]. — *Manuscript*, Geological Institute of Hungary, Budapest.
- TURCZI G. 2001: Hulladék-elhelyezés – döntés-előkészítés térinformatikával (in Hungarian, with English abstract: Waste disposal – decision making using GIS). — *Földtani Közöny* 131 (3–4), pp. 533–540.

## Földtani térmodell építése és alkalmazása a Bátaapáti (Üveghutai)-telephelyen

TURCZI GÁBOR, ALBERT GÁSPÁR, HAVAS GERGELY, TISZA ANDRÁS

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

**Tárgyszavak:** adatkezelés, adatfeldolgozás, Délkelet-Dunántúl, digitális adatok, digitális terepmodellek, földtani térképek, háromdimenziós modellek, Magyarország, matematikai modellek, Mórággy-rög

### Összefoglalás

A modellépítés célja, hogy a valóságot valamilyen szempont szerint hűen tükröző rendszert alkossunk, amelyen kísérletezhetünk, vagy kérdéseinkre választ kaphatunk. A földtani modell a földkéreg egy adott részletének földtani felépítését, azon belül a kőzettestek tulajdonságát képezi le. A földtani modellben szereplő adatok hierarchikusan két csoportra oszthatók: elsődleges, illetve levezetett adatokra. A modell elsődleges elemeit a terepdomborzat adatai, a képződmények felszíni kibúvási és a fúrási adatbázisból nyert adatok szolgáltatták. Másodlagos, azaz levezetett adatként szerepeltek a kézzel szerkesztett mélyföldtani képződményhatárok és felületek.

A kutatás során a térmodell építésének alapvető célja földtani kép kialakítása és a vízföldtani modellezés kiszolgálása. Ehhez a következő alapfelületek előállítására volt szükség: terepdomborzat, alaphegység-domborzat, negyedidőszaki feküldomborzat. Az alapfelületek és a mélyföldtani térkép felhasználásával levezethetővé vált a felszíni földtani térkép. A fúrásokban észlelt törésvonalak és kőzethatárok adatai mellett a modellnek különböző vizsgálati módszerek eredményeire alapozott levezetett adatok (pl. feltételezett törési síkok) is részét képezték. Így sor került a törésvonalak hierarchiájának meghatározására, valamint az alaphegység további tagolására, monzonitos és monzogránitos összetételű kőzettestek lehatárolására.

### Bevezetés

A modellépítés célja, hogy a valóságot valamilyen szempont szerint hűen tükröző rendszert alkossunk, amelyen kísérletezhetünk, vagy kérdéseinkre választ kaphatunk. A modell a valóságot valamilyen attól eltérő, számunkra azonban kezelhető módon ábrázolja. Ez az ábrázolási mód rendszerint valamilyen matematikai megközelítésen alapul, amely többkevesebb észlelhető adatra épül. A földtani modell a földkéreg egy adott részletének földtani felépítését, azon belül a kőzettestek tulajdonságát képezi le. A leképezés alapja egy olyan adathalmaz lehet, amely a tér különböző (felszíni vagy felszín alatti) pontjain vizsgált kőzettestet jellemzi. Ennek a leképezési eljárásnak kétdimenziós (2D) végterméke lehet egy térkép vagy egy földtani szelvény, amely ugyan képes több dimenziót is kifejezni, így az időt, illetve a tér harmadik dimenzióját, de nem helyettesítheti a háromdimenziós (3D) modell szemléletességét és adattároló képességét.

Egy dinamikus modell szükségszerűen képes kell, hogy legyen új adatok fogadására, feldolgozására és a kime-

neti oldalon ezeknek a módosításoknak a megjelenítésére. Ha ezek nem teljesülnek, akkor a modell statikus. A modell dinamikusságát és szemléletességét elsősorban a működtető fejlesztőszoftver határozza meg.

A modell tehát két alapvető elemből épül fel: egyik a működtető közeg (szoftver), másik a bemeneti adatbázis (alapadatok). A 3D földtani modell kifejezés nem pontosan definiált adatbázist és formalizmust takar, hanem erős általánosítást, amelytől azt várjuk, hogy a tér egy meghatározott részletéről folytonos információt adjon, valamint síkok, felületek mentén értelmezhető legyen. Bármilyen legyen a felhasználás célja, az alapfeladat a térrész földtani felépítésének megadása. Erre több mód is kínálkozik, amelyek közül az egyik a voxelekből, azaz homogénnek tekinthető, szorosan illeszkedő hasábokból építkező rendszer, ahol a hasábhöz tetszőleges információ (kőzet és tulajdonságai) rendelhető. Pontossága a voxelek méretétől, azaz a modell felbontásától függ. Hátránya, hogy az észlelési pontokra vonatkozó információ nem őrződik meg a modellben.

Egy másik megközelítési mód a különböző kőzettestek elterjedési határának, felületének, illetve vastagságának megadása. Ez a módszer az elsődleges észlelési pontokból kinyerhető információ (térképi foltok, fúrásadatok) torzításmentes, koordinátahelyes felhasználására épít. Míg az első módszer működési elve a 2D raszteres technikával analóg, addig a második a 2D vektoros ábrázolás technológiai elveit követi.

A földtani modell adatbázisa fúrásokra, felszíni és mélyföldtani térképekre és szelvényekre épül, konkrét megvalósítása az alkalmazói szoftver függvénye.

A következőkben a Bátaapáti (Üveghutai)-telephely felszíni földtani kutatása során felépített földtani térmodellt és a levezetett térképeket vesszük szemügyre.

A kutatás során a térmodell építésének alapvető célja földtani kép kialakítása és a vízföldtani modellezés kiszolgálása. Ehhez a következő alapfelületek előállítására volt szükség:

- terepdomborzat,
- alaphegység-domborzat,
- negyedidőszaki fekdomborzat.

A kőzettestek törésekkel és vetőkkel történő lehatárolása, valamint az alaphegység közeteinek elkülönítése és elterjedésük lehatárolása már összetettebb feladat, amihez az alapfelületek nyújtanak hátteret. A következőkben a modell adatszerkezetének áttekintése után először az egyes felszínnek előállításának folyamatát mutatjuk be, majd a tematikus topológiák előállításának ismertetése következik. A modellanalízis és a törészonák elemzése, bár szorosan kapcsolódott az előzőekhez, független modellezési környezetben zajlott.

### A modell adatszerkezete

A 3D földtani térmodell nemcsak a földtani struktúrák megértését, hanem a különböző kutatási területek adatainak szintetizálását is szolgálta. Ennek következménye, hogy a modellnek adattároló szerepet is be kellett töltenie, ami azt jelentette, hogy az elemezni, feldolgozni kívánt objektumok  $x$ ,  $y$  koordinátáin túl azok  $z$  magassági értékei is geometriai térben és nem leíró attribútumként (tulajdonságként) szerepeltek. A 3D modellt megfelelt az EOVS geodéziai térnek.

A beérkező adatok a földtani kutatás változatos jellege miatt igen eltérő formátumúak voltak. Ugyanez vonatkozott a kimenő adatokra is. Ahhoz, hogy az adatok a modellezési környezetben belül egységesen kezelhetők legyenek, azokat nemcsak az adatforrásuk, hanem keletkezésük szerint is osztályoztuk.

A földtani modellben szereplő adatok hierarchikusan két csoportra voltak oszthatók: elsődleges, illetve levezetett adatokra. A modell elsődleges elemeit a terepdomborzat adatai, a képződmények felszíni kibúvási és a fúrási adatbázisból nyert adatok szolgáltatták. Ezekből becslési eljárások során álltak elő a levezetett adatok. Az így keletkezett pontokat újabb, nagyobb prioritású adattal (pl. újabb fúrási adat) felül lehetett írni (ALBERT 2003a). Másodlagos priori-

tású, azaz levezetett adatként szerepeltek a kézzel szerkesztett képződményhatárok és felületek is (BALLA et al. 2003).

Feldolgozási szempontból az adatok geometriája döntő fontosságú. A modell folytonosságát a felületek biztosítják, ezek alapjául pontszerű vagy vonal menti ismeretek szolgálnak. Feldolgozásuk 3D szerkesztő és térinformatikai eszközökkel történik.

### A felületépítés általános menete

A felületek felépítése és adatszerkezeti modelljének ismerete elkerülhetetlenül szükséges a modellen elvégezhető elemzések, a modell korlátainak megértéséhez. Egy-egy felület a jelenlegi vagy valamely ősföldrajzi domborzatot modellezi.

A felületépítés általános menetét a terepdomborzat feldolgozásán keresztül mutatjuk be. A domborzatépítés alapvető feltétele, hogy a domborzati elemek jellemző pontjait, azok térbeli koordinátáinak ismeretében, egy 3D rendszerbe töltsük. Ez történhet táblázatból begépelve vagy automatikusan, helymeghatározó eszközökkel (pl. GPS, mérőállomás) gyűjtött adatok beolvasásával. Gyakori és a jelen munkában is alkalmazott módszer a szintvonalak és magasságpontok kalibrált térképlapokról történő digitalizálása, illetve a már meglévő digitális szintvonalrajz megfelelő elemének a hozzá tartozó magassági értékre való mozgatása. Az elkészített 3D szintvonalrajzot adatbázisba kellett importálni, amelybe a szintvonalak töréspontjainak értékein kívül egyéb jellemző — az interpolációt módosító — domborzati elemek (pl. alappont, csúcs, vető, törésvonal, árok, sík terület stb.)  $x$ ,  $y$ ,  $z$  értékei is bekerültek. Nagyon lényeges volt ebben a stádiumban a bevitt adat minősítése, ugyanis az interpoláció során másként kellett figyelembe venni az ezeket leíró adatsort. A feldolgozás teljes menetét az 1. ábra szemlélteti.

A felszínnek tárolása, ábrázolása kétféle módon történhet, az adatformátum azonban döntően meghatározza a további felhasználás lehetőségét.

A *TIN-modellben* (Triangulated Irregular Network: szabálytalan háromszögháló), a szintvonalak töréspontjait és egyéb bevitt, meghatározott magassági értékű pontokat térbeli háromszögek csúcspontjaiként értelmezve, a program egy szabálytalan térhálót alakít ki, amelynek geometriája a valódi felszínhez közelít. A TIN-modellben az általa lefedett terület bármely pontjának magassági értéke meghatározható a rá merőleges egyenes és a pontot fedő TIN-háromszög metszéspontjának meghatározásával. A TIN-modell előnye, hogy minden eredeti bevitt adatot megtart.

A *rácsaló-modell* (grid) egy szabályos, térben elhelyezkedő, sorokból és oszlopokból álló hálófelület, amely meghatározott kiterjedéssel (dimenzió) és tájolással (orientáció) rendelkezik. Kiterjedését a sorok és oszlopok száma, valamint azok szélessége határozza meg. Tájolása a háló egy kiemelt pontjának (pl. bal felső sarokpontjának) va-

lamely koordinátarendszerben megadott helyével, illetve esetleges elforgatási szögével történik. A kiemelt pont koordinátáinak és a kiterjedés paramétereinek alapján a rácsháló többi pontja is tájoltá válik. A 3D rácshálómodellben a sorok és oszlopok metszéspontjai a bemeneti adatokból interpolációval állíthatók elő. A bemeneti adatok megfelelnek a TIN-modell szabálytalan elhelyezkedésű pontjainak. A sorok és oszlopok közti távolság a modell felbontását adja meg.

A rácshálómodell előnye, hogy egymással fedésben lévő, azonos felbontással rendelkező felületek rácspontjai között matematikai műveleteket végezhetünk el (pl. összeadás, kivonás), ami lehetővé teszi különböző származtatott felületek létrehozását. A rácshálókkal végzett számításokhoz konstansok használhatók fel, továbbá a műveletek végrehajtása feltételekhez köthető. A felületmodellekkel végzett műveletek közé tartozik a keresztmetszvények és határfelületek szerkesztése, amelyet különböző szoftverek más-más mértékben támogatnak.

A gondosan elkészített rácshálómodellből kartográfásra alkalmas izovonalas térkép állítható elő, vagy különböző megjelenítésben folytonos árnyékolt felületek generálhatók.

Összefoglalva elmondható, hogy a modellépítés első lépése a különböző forrásból származó adatok osztályozása és a feldolgozó környezetbe való betöltése. A következő lépés a TIN-modell, és végül az ebből képezhető rácsmódel előállítás, amely alkalmas a felületek közötti műveletek elvégzésére is.

### Az alapfelületek előállítása

A terepdomborzat a földtani térmodell felső lehatárolása, s egyben a legpontosabban ábrázolható elsődleges felület. Fontos bemenő adata a vízföldtani modellnek, a töréses övek analízisének, illetve az alaphegység felszín- és a negyedidőszaki üledékek feküdomborzata alapján szerkesztett földtani térképnek

Kiindulási alapul a Földmérési és Távérzékelési Intézet (Fömi) 1:10 000-es méretarányú topográfiai térképeinek nyers, 3D domborzatrajza szolgált, ahol a szintvonalak 2,5 m-es alapszintközzel szerepeltek. Rendelkezésre álltak a völgyi keresztmetszvény-bemérésekből származó pontok és az azokból levezetett részletesebb (0,5 m-es szintvonal-sűrűségű) domborzatrajzok. Az eredeti szintvonalrajz pontossága  $\pm 83$  cm, a bemért völgyekben  $\pm 17$  cm. A munka első fázisában e két modellt szerkesztettük össze. Problémát a két domborzatrajz felbontásbeli különbsége, illetve a szintvonalak 1:10 000-es méretarányhoz igazított, generalizált rajzolata jelentett.

A következő lépésben a terepidomok környezetének pontosítására került sor. Mivel a Fömitől beszerzett domborzatrajz nem tartalmazta az egyéb terepidomokat (leszakadás, vízmosás, útbevágás, töltés stb.), ezeket is hozzá kellett szerkeszteni a modellhez (2. ábra). A nagyobb pontosság érdekében ezeket a morfológiai elemeket is szintvonalal rajzoltuk meg. Alapul az 1:10 000-es méretarányú topográfiai

térkép szolgált. A szoftverek lehetőséget adtak volna a terepidomok idomrajzának közvetlen bevitelére is, ezzel a módszerrel azonban nem feleltek volna meg a 2 m-es felbontásnál elvárható pontossági paramétereknek.

A szintvonalrajz mellett, a modell pontosságának növelése érdekében, bemenő adatként szerepeltek a völgytalpak szintvonalai is, amelyek segítségével megelőzhetőek voltak az interpolációs eljárás során a domborzatmodellben helyenként megjelenő, nem létező völgytalpi „gödrök”. A vízfelületek egységes, vízszintes felületként való értelmezése miatt azok területét ki kellett zárni az interpolációból, így kontúrvonalai is bekerültek a modellbe.

A területet több részre osztottuk annak érdekében, hogy a feldolgozás folyamatát felgyorsítsuk. Minden nagyobb munkafázist ellenőrzés követett, amelynek célja a rajzi hibák, a rossz magasságra került szintvonalak, a vonalszakadások stb. kiszűrése volt. A munkafolyamat során ezeken kívül a külön feldolgozott részek egymáshoz illesztését is ellenőrizni kellett.

A feldolgozás utolsó szakaszában a pontosított szintvonalrajzból TIN-modell készült, majd ebből lineáris interpolálással egy  $2 \times 2$  m-es rácspontsűrűségű grid, azaz rácshálómodell. Ezt az értéket az határozta meg, hogy ennél rosszabb felbontás esetén a modellből — részlegesen vagy teljesen — eltűnnek a szűkebb völgyek, vízmosások, útbevágások stb., illetve ennél jobb felbontás előállítása már jelentős időnövekedéssel járt volna, mivel a szükséges számítások mennyisége exponenciálisan nő. A modell területe  $4501 \times 4001 = 18\,008\,501$  pixel, ami  $72 \text{ km}^2$ -t tesz ki.

A levezetett felületek közül elsőként az allúviummodell készült el. Az allúviummodell alapja a Dudko A. által fúrás adatokból szerkesztett vastagságtérkép volt, amelynek 0 vastagságot jelölő szintvonala egyben az elterjedés határának felelt meg. Ennek digitális feldolgozása egy 1 m-es szintvonalközü izovonalas térképet eredményezett, amelyből vastagságmodell készült, előbb TIN, majd  $2 \times 2$  m-es rácspontsűrűségű térhálószerkezetben. Ezt kivonva a domborzatmodellből, előállt az allúvium feküdommodellje.

Az alaphegység-domborzat modelljének kiindulási alapja a Balla Z. által 10 m-es alapszintvonalakkal készített ősföldrajzi domborzat volt. Az izovonalas térkép szkennelése és digitalizálása után az alapszintvonalak 2,5 méteresre kellett sűríteni, hogy a kapott felület egyenletesebb legyen. Az alapadatok ellenőrzése hasonlóképpen zajlott, mint a terepdomborzat-modellnél. A 3D vonalműből a terepdomborzat-moddellel megegyező felbontású és elhelyezkedésű TIN-, majd rácshálómodell készült. Az alaphegység-domborzat felszínmodelljének és az allúviumfekü-modellnek a terepdomborzattal vett metszsvonal az alaphegység felszínre bukkanásának vonalát képezte (3. ábra). Ez helyenként eltért a már ismert és rögzített felszíni kibúvásoktól. Az eltérések javítása a kiindulási szintvonalrajzon történt úgy, hogy a szintvonalrajz helyi módosításával az elméleti (ősföldrajzi) felszínt emeltük vagy süllyesztettük. Az új szintvonalrajzból ismét rácshálómodell épült. Ez az iteráció addig tartott, amíg az eltérés kisebb nem lett, mint  $\pm 80$  cm. A kapott rácsháló-

modellből a következő: algoritmussal állítottuk elő az alaphegység domborzati modelljét:

ha

$$AHO \geq DTM,$$

akkor

$$AHF = DTM - ALV,$$

ha

$$AHO < DTM,$$

akkor

$$AHF = AHO,$$

ahol

DTM — a terep domborzata,

AHO — az alaphegység ősföldrajzi domborzata,

AHF — az alaphegység domborzata,

ALV — az allúvium vastagsága (az elterjedési határon kívül a teljes modellterületen 0 vastagságértékkel szerepel).

A negyedidőszak feküfelszíne három modellezhető egységből állt: a közvetlenül az alaphegységre települő miocén, pannóniai és negyedidőszaki üledékek elterjedési területéből. A miocén és pannóniai üledékek elterjedési és vastagságtérképeiből indultunk ki, amelyeken a szintvonalak sűrűsége 10 m volt. Az alaphegységfelszínhez hasonlóan itt is sűríteni kellett a szintvonalrajzot, és az ellenőrzés is hasonlóan történt. Külön-külön készültek el a miocén és a pannóniai TIN-, illetve rácshálómodellek, mivel ezek képződményei egymástól függetlenül települnek az alaphegységre. Az így kapott vastagságmodell és az elméleti alaphegységfelszínmodell összeadásával keletkezett a negyedidőszaki üledékek elméleti fekümodellje.

Ennek algoritmusa a következő volt:

ha

$$NFO = AHO + MPV,$$

akkor

$$NFO \geq DTM,$$

ha

$$NFF = DTM - ALV,$$

akkor

$$NFO < DTM,$$

$$NFF = NFO,$$

ahol

MPV — alsó-miocén és pannóniai üledékek vastagsága,

NFO — negyedidőszaki fekü domborzat az alaphegység ősföldrajzi domborzata mentén,

NFF — negyedidőszaki fekü domborzat az alaphegység ősföldrajzi domborzatánál mélyebb helyzetben.

Valamennyi felszínből a térképek számára kartografált 10 m-es szintvonalrajz készült. A képződményhatárok felszínre bukkanásának vonalai szintén felkerültek a térképekre.

### A felszíni földtani térkép építése

A fentiek alapján tehát három független, térben egymást kiegészítő alapfelszín áll rendelkezésre: a terepdomborzat (DTM), az alaphegység-domborzat (AHF) és a negyedidőszaki fekü domborzat (NFF). A felszínnek a modell

alapvető építőelemei, s noha a modellépítés fő célja a vízföldtani viszonyok és ezzel összefüggésben a töréses zónák elemzése, alkalmas arra, hogy származtatott földtani térképet generáljunk felhasználásukkal. Ehhez 3D és térinformatikai eszközök összehangolt alkalmazására van szükség.

Esetünkben a 3D műveletek színtere a sorokból és oszlopokból felépülő szabályos rács, ahol a feldolgozás ún. raszteres technikára épül. A végső kimeneten térinformatikai feldolgozásra alkalmas — vektoros — vonalmű, azaz szintvonalrajz, területhatároló elem kell, hogy megjelenjen. A raszteres és vektoros adatformátumok között konverziót hajtunk végre.

A térinformatikai műveletek színtere a topológia. A topológia a digitális térkép olyan adatformája, ahol a grafikus objektumok térben rendezettek, és a szokásos halmazműveleti operátorok mellett ún. térbeli operátorok is megjelennek (TURCZI 2001). A térbeli operátorok helymeghatározó kifejezések (pl. hol található az A tulajdonságú térképi elemek azon részei, amelyek a B tulajdonságút érintik, átfedik, tartalmazzák stb.). A topológia építőelemein, a grafikus objektumokon tehát halmazműveletek hajthatók végre. A műveleteket szűrésnek vagy topológiai lekérdezésnek nevezzük, s azok kötött nyelvtanú parancsok formájában adhatók meg, amelyek végrehajtási eredménye ismét egy topológiailag rendezett tematikus vonalmű vagy térkép. A topológia másik fontos tulajdonsága, hogy a fedésben lévő tematikák öröklik egymás tulajdonságát (pl. ha az A formációt B típusú vető metszi, akkor a vető is A tulajdonságú is lesz, azaz tudható lesz, mely formációt harántolja).

A következőkben tekintsük át a 3D eszközök és a térinformatika eredményeit összehangoló műveletsort, amelynek során alapadatokból szerkesztett földtani térképet állítottunk elő.

Első lépésben, 3D környezetben, a jelenlegi terepdomborzat és az ősföldrajzi felszínnek közötti műveletekkel az egyes földtani egységek felszínre bukkanási sávja állt elő.

Vizsgáljuk az alaphegység felszínre bukkanásának, kiékelődésének vonalát (AHK), illetve a negyedidőszaki fekü kiékelődésének vonalát (NFK), amelyek a következő, 3D felszínnek között értelmezett művelettel állíthatók elő.

$$DTM - AHF \rightarrow AHK,$$

$$DTM - NFF \rightarrow NFK.$$

A terepdomborzat és az ősföldrajzi felszínnek metszészvonala 3D térgörbe, felülnézeti képe zárt görbéket, azaz területi elemeket alkot. Ha figyelembe vesszük az allúvium-elterjedési kontúrt (ALK), a három egymásba ágyazott terület a földtani térképen a negyedidőszaki, a pannóniai–alsó-miocén és az alaphegységi képződmények felszíni elterjedését jelöli ki.

Második lépésben térinformatikai eszközökkel a felszíni földtani térkép előállítására került sor. Az alaphegység és a negyedidőszaki fekü felszínén lévő kőzetek elterjedését fúrasi adatok alapján Balla Z. szerkesztette meg. A térinformatikai feldolgozás alapja a komplex topológia volt, amelyet esetünkben a következő tematikák építettek fel:

— az alaphegység mélyföldtani képe (AMK) — lehatárolt kőzettestek terület típusú ábrázolással, telérek vonalas

ábrázolással,

— a negyedidőszaki fekü mélyföldtani képe (NMK) — lehatárolt kőzettestek terület típusú ábrázolással,

— az alaphegység felszínre bukkanási vonala (AHK) — zárt területek,

— a negyedidőszaki fekü felszínre bukkanási vonala (NFK) — zárt területek,

— az allúvium elterjedési határa (ALK) — zárt területek.

A topológiát tehát öt területi és egy vonalas elemből (telérek) építkező tematika építi fel. A topológián elvégzett műveletek a következők (4. ábra):

Az alaphegység és a negyedidőszaki fekü felszínre bukkanása, valamint az allúvium-elterjedési területek uniója a negyedidőszaki üledékek elterjedési területét (Q) és egyben a negyedidőszaki üledékekkel nem fedett kiegészítő területet (NQ) állítja elő:

$$\text{AHK} + \text{NFK} + \text{ALK} \rightarrow \text{Q/NQ}.$$

A pannóniai üledékek felszíni elterjedése (NFE) a negyedidőszaki üledékekkel nem fedett terület és az allúvium, valamint az alaphegység felszíni elterjedésének különbözetéből képezhető:

$$\text{NQ} - (\text{AHK} + \text{ALK}) \rightarrow \text{NFE}.$$

Az alaphegységi képződmények felszíni elterjedése (AHE) a negyedidőszaki üledékekkel nem fedett terület és az allúvium, valamint a negyedidőszaki fekü felszíni lehatárolásának különbségéből képezhető.

$$\text{NQ} - (\text{NFK} + \text{ALK}) \rightarrow \text{AHE}.$$

Az alaphegységi képződmények felszíni tagolása (AFE) az alaphegységi mélyföldtani kép és a felszíni elterjedés közös része. A térkép ezen elemei ún. térbeli operátor alkalmazva állíthatók elő:

$$\text{AHE, ahol AMK-t, „TARTALMAZ”,} \rightarrow \text{AFE}.$$

Az eredmények összevetése az észlelési térképpel rámutat a modell hibáira, azaz a felszíni észlelésekből, a fúrási rétegsorokból következtetett információ és a szerkesztett térkép ellentmondásaira.

A 3D felületmodellek térinformatikai műveletekkel, Intergraph technológiára támaszkodva készültek el.

### Modellanalízis, töréses övek elemzése

A kutatás előrehaladtával bővülő adatbázisok változásait a modellezett földtani objektumoknak is követniük kellett, hogy azokat fel lehessen használni egy előzetes földtani kép megalkotásánál, aminek következtetései visszahatottak magára a modellre is. A modellanalízis tehát egy többlépcsős folyamat, amelynek minden fázisában nélkülöz-

hetetlen követelmény a modell adatainak naprakészsége. A modellanalízis fázisában a matematikai módszerekkel korábban létrehozott alapfelületek (1. feljebb) már adatbázisban tárolt adatként szerepeltek, amelyek igény szerint meghatározott területre megjeleníthetők (5. ábra), illetve az automatikusan létrehozható, tört nyomvonalú szelvényeken feltüntethetőek voltak.

A fúrásokban észlelt töréses övek és közethatárok (monzogranit és monzonit között) magas prioritású adatai mellett a modellnek (BALLA et al. 2003) különböző vizsgálati módszerek eredményeire alapozott levezetett adatok (pl. feltételezett törési síkok) is részét képezték.

A modellben 176 fúrás (beleértve a ferdefúrásokat is) egyszerűsített rétegsora szerepelt koordináta- és mérőhelyesen. Az egyszerűsítés eredményeként három képződménytípust különítettünk el: monzogranitoid, monzonitoid és üledékes képződmények. A fúrások részletes rétegsorát attribútumadatként csatoltuk a modell tér megfelelő pontjaihoz.

Mivel a fúrásban észlelt törészónák iránya ritkán volt meghatározható, azok modellezése másodlagos információkon, köztük vízföldtani adatokon alapult. Az egyedi törésmodellek (síkok) a fúrási rétegszlopok észlelési pontjaihoz kötődtek, és előállítási módjuk alapján három típusba voltak sorolhatóak:

a) egy észlelési ponton, adott dőléssel és azimuttal megadható síkok;

b) két észlelési ponton, adott dőléssel és dőlésiránnyal megadható síkok;

c) három észlelési ponttal megadott síkok.

A töréses övek vastagságát az érintett fúrásokban észlelt átlagértékekkel adtuk meg. A feltételezett töréses övek, amelyeket közvetett információ alapján jelöltünk ki, ugyanilyen módon kerültek a modell térbe, de vastagságukat 1 m-es értékkel adtuk meg.

Az előzetes földtani értékelés alapján sok esetben módosítani kellett a töréses övek paramétereit. Ezeket az értékeket táblázatban rögzítettük és hozzáadtuk a modellhez. Az értékek változtatásával az öveget jellemző objektum paraméterei is változtak. A változtatások mértékét és jellegét a modell vizuális értékelése során határoztuk meg.

Ezt követően került sor a töréses övek hierarchiájának meghatározására, majd az alaphegység további tagolása következett monzonitos és monzogranitos összetételű kőzetekre. A közethatárok definiálása a viszonylag sűrű fúrás-hálózat ellenére kézi szerkesztéssel történt, mivel a tisztán matematikai modellek félrevezető eredményt adtak volna a térrész átívelő törészónák miatt. A képződmények határfelületének szerkesztésekor a modellből származtatott előzetes földtani értelmezés képezte a kiindulási alapot. Az inhomogén kőzettestek ilyen módon történő tagolásához komplex szerkezetföldtani ismeretek is szükségesek, amelyek akkor érvényesíthetők, ha a vizsgálatot végző szakértőnek lehetősége van a 3D modell térbeli tanulmányozására.

A modellanalízishez használt szoftverkörnyezet kiválasztása során fontos szempont volt tehát, hogy szabadon lehessen mozogni a modell térben, illetve tetszőlegesen beállított nézőpontból lehessen szerkeszteni az objektumokat.

Figyelembe kellett venni továbbá, hogy már az előzetes elemzés adatainak is gyorsan és megfelelő formában el kellett jutnia a felhasználókhöz (hidrogeológus, geofizikus, tektonikai stb. szakemberek). A kimenő adatok legtöbb esetben ASCII formátumú AutoCAD cserefájlok (dxf) voltak, de sok esetben nyomtatott, méretarányhelyes vízszintes földtani metszetek és tört nyomvonalú földtani szelvények (6. ábra) kerültek a felhasználókhöz (BALLA et al. 2003).

A kiválasztott fejlesztőszoftver (Autodesk Land Desktop 3) lehetőséget adott a modellezni kívánt felületek interaktív szerkesztésére, illetve módosítására újabb adatokkal; továbbá lehetővé tette a felhasználók számára, hogy a 3D modellt tetszőlegesen forgathassák, a felületek megjelenítését, illetve lehántolását igény szerint módosíthassák, valamint szelvények, tömbszelvények nyomvonalának szabad megválasztásával segítsék elő a terület földtani felépítésének jobb megismerését. A nézőpont tetszőleges megválasztása, valamint a modell térben történő szabad mozgás miatt jelentősen könnyebbé váltak a szerkesztési feladatok a 3D geodéziai térben. A modell részletessége felhasználói beállítás függvénye, de célszerű volt úgy megválasztani, hogy alkalmazkodjon a beérkező adatok pontosságához, ami jelenleg milliméteres nagyságrendű (ALBERT 2003a).

Látható tehát, hogy az adatok beillesztése és a modellezés, amely mintegy 72 km<sup>2</sup> terület felszíni és felszín alatti képződményeit dolgozta fel, két egymástól elválaszthatatlan, párhuzamosan zajló folyamat. Ezekkel szintén párhuzamosan zajlott a szerkesztés alatt álló modell előzetes elemzése is, amit elősegítettek a modellben kijelölt tömbszelvények, tetszőleges irányú és nyomvonalú szelvények, illetve az adott tengerszint feletti magasságban képzett vízszintes földtani metszetek. Ezek mentén tanulmányozhatók és esetenként módosíthatók voltak a modellezett felületek és törések, amit a rugalmas szerkezetű, dinamikus 3D modell tett lehetővé.

## Összefoglalás

Az előző fejezetekben a földtani térmodell építésének célját, adatszerkezetét és tulajdonságait vázoltuk. Bemutattuk, hogy az alap- és szerkesztett adatok felhasználásával új, származtatott információ állítható elő. Noha a feladat konkrét szoftverek felhasználásával valósult meg, általános megfogalmazásban vázoltuk a 3D szerkesztő eszközök és a topológiára épülő térinformatika alkalmazását. Fontosnak tartjuk kiemelni, hogy a felépített modell olyan interaktív és vizuális munkára ad lehetőséget, amely hagyományos eszközökkel nem, vagy csak nehezen végezhető el. A modell egyben különféle térképi és táblázatos adatokat integrál, eközben elvégezhető a modellalkotó elemek ellenőrzése a kimutatható ellentmondások feloldásával. A modell fejlődéséhez hozzájárul a levezetett adatok beépülése.