

## Az alagútépítés hatása a Gellért tér környékén, a mérnökgeológiai viszonyok tükrében

Barsi Ildikó

BME, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, ildiko.barsi@gmail.com

Görög Péter

BME, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, gorog.peter@gmail.com

Török Ákos

BME, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, torokakos@mail.bme.hu

**ÖSSZEFOGLALÁS:** A Gellért tér környékén a 4-es metró építése során a területen található feltöltés (2-5 m) alatt a fúrások tanulsága szerint dunai hordalék található. Az alagút az oligocén agyagokban készült el, amelyek mechanikailag nem egységesek felső részük fellazult zónával jellemezhető. Az építést során a területen található néhány épület megsüllyedt, és ezen süllyedések modellezését mutatja be a cikk, felhasználva a laborvizsgálati eredményeket mint bemenő paramétereket. A süllyedésszámításhoz a Depression és a Tunnel modellt alkalmaztuk. A számítások azt mutatják, hogy átlagos paraméterek használatakor 3-4 cm süllyedés következik be. A valóságban is ehhez közel álló értékeket mértek az épületeknél.

*Kulcsszavak:* oligocén agyag, számítógépes modellezés, metró

### 1 BEVEZETÉS

A 4-es metró építésének gondolata már több évtizede megszületett a város vezetőinek és tervezőinek gondolataiban. A kivitelezést több mint 30 éves előkészítő tevékenység előzte meg, mely során rengeteg talajfeltárás mélyült az altalajviszonyok megismerésére. Ezeknek összegzésére, összefoglalására soha nem került sor, pedig rengeteg munkát, pénzt, időt, újabb feltárásokat lehetett volna spórolni vele.

A megvalósításra került tervek szerint a most épülő nyomvonal egyelőre két szakaszból áll. Az első szakaszt a Kelenföldi és a Keleti pályaudvar összekötő 7,3 km hosszú alagutak alkotják, melyek 10 állomást foglalnak magukba, a második szakasz további öt állomás és 4 km alagút kivitelezését igényli, melyek a Keleti pályaudvar és a Bosnyák teret kötnék össze.

A 4-es metró egyik tervezett állomása a Szent Gellért téri környékén is számos fúrás készült korábban és napjainkban egyaránt. Ezen cikk alapja ezeknek a feltárásoknak, és a belőlük meghatározott talajmechanikai adatoknak a rendezése, összegezése. Választásunk azért esett éppen a Szent Gellért térre, mert egyrészt az idén nyáron itt mélyült fúrások magmintái a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tsz. Mérnökgeológiai Tanszékcsoportjának laboratóriumába kerültek, így lehetőség nyílt azok vizsgálatára.

A korábbi mérések egységes összefoglalása mellett célunk volt ezen adatok új vizsgálati eredményekkel való kiegészítése, illetve a terület modellezése is. Több számítógépes program segítségével kétdimenziós geotechnikai modellt állítottunk fel a meghatározott talajfizikai paraméterek alapján. A terület geológiai modelljének eredményeiből végeselemes geotechnikai szoftverek segítségével az alagútépítés hatására kialakuló felszínsüllyedést határoztuk meg. A süllyedésvizsgálat napjainkban nagyon aktuális, hiszen a sajtó is hangos a metróépítés okozta épületkároktól, illetve - a területre vonatkoztatva - a BME Ch épületének süllyedéséről, az épület károsodásaitól. A munkákban rávilágítunk arra, hogy a végeselemes szoftverek talajmechanikai bemenő adatainak megválasztása milyen fontos, ugyanis a bemenő adatok kis különbségeiből is jelentős eltérések adódhatnak a végeredményekben.

## 2 VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A területről és környékéről készült földtani és vízföldtani szakirodalmak, szakvélemények segítettek a Gellért tér geológiai sajátosságainak, legfontosabb alkotó kőzeteinek megismerésében. A metró megállóról pedig az elérhető tervek, a helyszínrajzok, a metszetek, az alkalmazott technológiai leírások stb. adtak információt.

Az állomás földtani környezetének és a rétegződés részletes megismerése céljából a területen készült fúrások szelvényei és a laboratóriumi vizsgálatok eredményei kerültek összegyűjtésre. A különböző időben és technikai színvonalon készült fúrások különböző talajfizikai tulajdonságokról adnak részletes képet (a fúrások helyszínrajzát lsd. 1. ábra). Az összegyűjtött adatok statisztikai módszerekkel kerültek feldolgozásra. A legtöbb adat a tardi és a kiscelli agyag jellemzőiből állt rendelkezésre, hiszen az alagutak az egész budai oldalon ebben a kőzetben haladnak ill. a Gellért téri megálló is agyagba mélyült.

A legfrissebb (2008 nyarán talajvízészlelő kutak céljából mélyült) fúrások a BME Mérnökgeológiai laboratóriumába kerültek feldolgozásra. A statisztikai adatokat, és az eddigi vizsgálatok eredményeit tehát újabakkal tudtuk kiegészíteni.

A beérkezett mintákon víztartalmi, a jellemző agyagrétegeken (tardi és kiscelli agyagon) plasztikus, a negyedidőszaki rétegeken pedig szemeloszlás-vizsgálatok és vízáteresztő képességi vizsgálatok készültek. A Csíky utcai fúrás három különböző mélységbeli mintáiból - ami rendre az alagút felett, az alagút szelvényében ill. az alagút alól származik- triaxiális vizsgálat készült, melynek segítségével megállapítható a belső súrlódási szög és a kohézió értéke. A vizsgálatok nagy része a BME Geotechnika Tanszékének laboratóriumában készült. Az elvégzett vizsgálatok eredményeit az 1. számú táblázat tartalmazza, a mintavétel mélységének és helyének feltüntetésével.

A szellőző alagút, a déli és az északi peronalagút feletti, a BME CH épület alatti talajrétegek süllyedésének és feszültségi viszonyainak megismeréséhez számítógépes modellt alkalmaztunk. A FINE GEO4 nevű programcsomagjának két modulját használtuk a Depression-t és a GEO4 Tunnelt. Ez utóbbi programot geotechnikai feladatok véges elemek módszerével történő megoldására fejlesztették ki (mint például terepsüllyedés, szádfalazás, szerkezetek alátámasztása, rézsúállékonyság, talpgerendák, földkiemelés, stb.).

1. táblázat. Elvégzett vizsgálatok

| <b>vizsgálatok</b>        | <b>víztartalom vizsgálat [w]</b> | <b>plasztikus index [I<sub>p</sub>]</b> | <b>folyási határ [w<sub>l</sub>]</b> | <b>sodrasi határ [w<sub>p</sub>]</b> | <b>szemeloszlási vizsgálat</b> | <b>vízáteresztés vizsgálata</b> | <b>triaxiális vizsgálat</b> |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| <b>helyszín</b>           |                                  |                                         |                                      |                                      |                                |                                 |                             |
| <i>BME kert (S-1)</i>     | 3,0-14,5 m fél m-ként            | 14,5 m                                  | 14,5 m                               | 14,5 m                               | 8,0 m<br>10,5 m<br>11,5 m      | 7,5 m                           |                             |
| <i>Csíky u. (S-2)</i>     | 5,5 - 18,2 m fél m-ként          | 17,0 m                                  | 17,0 m                               | 17,0 m                               | 6,5 m<br>8,5 m<br>18,2 m       | 8,5 m                           | 21,0 m<br>23,8 m<br>29,5 m  |
| <i>Bartók B. u. (S-3)</i> | 6,0-10,1 m fél m-ként            | 10,1 m                                  | 10,1 m                               | 10,1 m                               | 7,0 m                          | 7,0 m                           |                             |

A Depression nevű alkalmazás kifejezetten üregek feletti terepsüllyedések kiszámítására dolgozták ki. A szoftvernél már a geometria bevitelénél nehézségek álltak elő, mivel komoly megkötéseket tartalmaz, pl. csak 2 alagút modellezhető, melyek keresztmetszete csak kör lehet, ill. a köztük lévő távolság is maximalizálva van, stb. A számítás során pedig a talajok talajfizikai jellemzői közül csak a térfogatsúllyal és a belső súrlódási szöggel számolt, ill. annak a talajnak a rugalmassági modulusával, amiben az alagút halad. Így ennek a számításnak az eredményét, csak mint közelítő számítást tudtuk figyelembe venni.

A Tunnel nevű modul már megfelelő véges elemes programnak bizonyult mind a geometria, mind a talajjellemzők, mind az analízis terén. Ez a program egy 2D-s program, amely vonalas létesítmények keresztmetszeteinek számítására megfelelő.

Ez az alkalmazás öt féle talajmodell lehetőségét kínálja, mely fontos szerepet játszik az adott talaj vagy kőzet reakcióinak pontos meghatározásában (lineárisan rugalmas, módosított lineárisan rugalmas, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Cam Clay).

A program tartalmaz egy automatikus geometria beviteli korrekciót illetve beépített hálógenerátort, amely jelentősen leegyszerűsíti a végelem háló elkészítését, melynél 3 és 6 csomópontú háromszög-elemek állnak rendelkezésre. A háló sűrűsége állandónak feltételezett az egész modellre, de könnyen besűríthető a kívánt területeken, adott esetben pl. az alagútszelvényekben.

A program a peremfeltételeket automatikusan határozza meg, így a legtöbb esetben nem kell ezzel foglalkozni. Az esetleges további peremfeltételek (befogott, csuklós, rugós, elmozdulás) bárhol megadhatók a talajtömegben.

Az alagút falazatot vagy szádfal szerkezetet gerenda elemek megadásával lehet modellezni. A számítás eredményeképp a program előállítja az igénybevételeket a gerenda mentén. A gerenda elemek a topológiában már meglévő vonalak mentén adhatók meg.

A programban nincs korlátozva az elhelyezhető terhek száma (sávós, trapéz eloszlású, vonalmenti). A teher hathat meghatározott felületre, vagy bárhol a talaj/ kőzet tömegben. Egy későbbi fázisban a meglévő teher módosítható az intenzitás változtatásával, vagy teljesen el is hagyható a számításból.

Ahhoz, hogy a Gellért téri szellőző- és peronalagutakra ezeket a szoftvereket alkalmazni lehessen, szükség volt az alagutak és a környék geometriai paramétereire, ill. a jelen lévő talajok rétegzettség viszonyainak ismeretére és az egyes közettípusok talajfizikai jellemzőire.

### 3 TERÜLET JELLEMZÉSE

Bár Budapest morfológiai viszonyai igen változatosak, és a budai rész inkább hegyvidékes arculatáról ismert, mégis a 4-es metró nyomvonala végig síkvidékű területen halad. A budai része a Budai hegység déli előterében, a pesti rész pedig a Pesti síkság alatt fut. A nyomvonal feletti felszín maximális szintkülönbsége 10-20 m (GEOVIL, 2005a). A budai rész zömében ártéri sík, nyugaton pedig az ártéri síkhoz szorosan kapcsolódó alacsony Duna terasz.

### 4 FELTÁRÁSOK

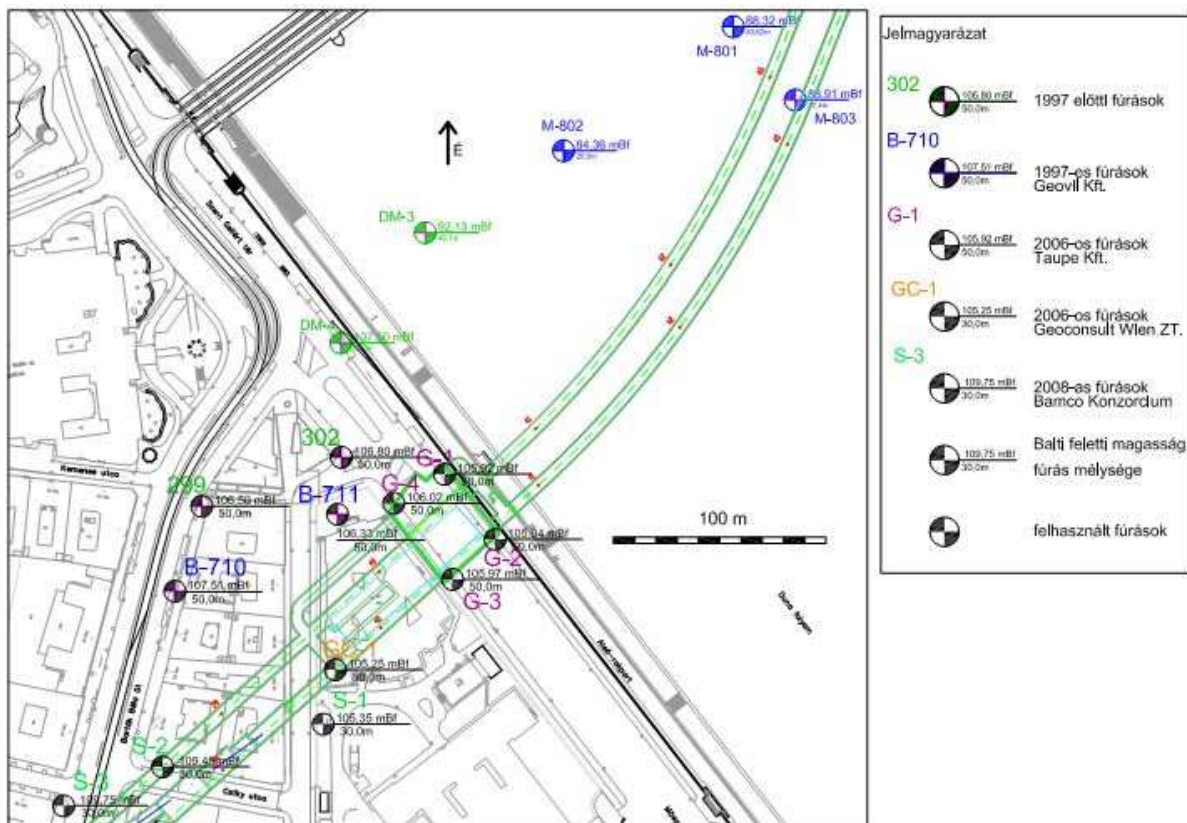
Az elmúlt évtizedekben, amióta a Dél-Budát Zuglóval összekötő metróvonal ötlete felmerült, számtalan tanulmány, vizsgálat, fúrás, szakvélemény készült, amelyek Budapest altalajának megismeréséhez nagyban hozzájárultak. Az OFKfV, a METROBER és az UVATERV megbízásából 1966-1980 között, az épülő budapesti metró-vonalak kutatására kb. 500 db, 20 ezer fm földtani kutatófúrást mélyített, melyek mélysége 30-200 m között volt (Hegyi et al., 1981). A Geovil Kft. helyszínrajza nyomán az 1. ábra tartalmazza az eltérő időben és technikai színvonal készült fúrásokat.

Az 1997 előtt végzett fúrások során duplafalú magcsővel készültek a feltárások, a talajfizikai vizsgálatokhoz történő minta-előkészítések során 65 mm átmérőjűre faragták a mintákat.

Az 1997-ben készült fúrásokat a Geovil Kft. végezte korszerű nagyátmérőjű folyamatos magfúrásos módszerrel, Wire Line technológiával és Geober S triplafalú magcsővel 50,0 m mélységig. Ez a technológia biztosította az „in situ” állapotú talajminták nyerését. Ezen fúrások helyeit a B70.. jelzések jelölik.

A G-.. jelű fúrásokat, melyeknek helyei a Gellért téri állomás vasbeton aknájának sarkain találhatók, a Taupe Kft. mélyítette 2006 áprilisában. A négy fúrás 50,0 m mély, nagy átmérőjű ( $\Phi$  110 mm), folyamatos magmintavételű fúrás. Ezen kívül három helyen dinamikus szondázásos feltárás is készült, melyek 10 m környékén sorra elakadtak.

Az S-.. jelű fúrások a legfrissebbek, 2008 nyarán mélyültek. A megbízó az alagutakat és a Gellért téri állomást is építő Bamco konzorcium volt. Mindegyik helyszínen (Műegyetem kert, Csíky utca, Bartók Béla utca) egymás mellett két fúrást fúrtak. Az egyik kutat talaj-, a másikat rétegvíz megfigyelés céljából létesítették. A talajvíz megfigyelő kutakat csak a vízzáró agyagrétegig mélyítették (13, 10 ill. 9 m mélységig),  $\Phi$  125 mm átmérővel, spirálfúróval. A másik fúrás talpmélysége 30 m, átmérője  $\Phi$  110 mm, a mintavétel PVC magcső segítségével történt. A fúrási anyagok a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék mérnökgeológiai laboratóriumába kerültek.



1. ábra. Fúrások helyszínrajza (GEOVIL, 2005a átszerkesztve)

## 5 GEOLÓGIA ÉS HIDROGEOLÓGIA

### 5.1 Geológia

A Szent Gellért tér környéki vonalszakasz mélyföldtani alapját a felső triászban képződött földolomit (Sashegyi Dolomit Formáció) alkotja. A Budai-hegység a Dunántúli középhegység legtagozottabb, legnagyobb mértékben töredezett része. Ennek a tagozódásnak köszönhető, hogy a földolomit a Szent Gellért tér környékén és a Duna alatti átvezetés szakaszán erősen kiemelt helyzetű a nyomvonal többi részéhez képest.

Az ó-harmadidőszaki képződmények - az alapkonglomerátum, a nummuliteszes mészkő és a budai márga - a Gellért hegy karsztrendszerének alkotóelemei a földolomittal együtt. Ezek a paleogén képződmények egyetlen nagy üledékciklus termékei. A Budai-hegységet a felső-eocén elején érte el a tenger, amikor is legelőször durvakavics rakódott le, amire a sekélytengeri Szépvölgyi Mészkő Formáció települt. A felső-eocénben gyors tengermélyülés következtében a Szépvölgyi Mészkőre a mélyvízi agyagos-márgás összlet, a Budai Márga Formáció rakódott. A Szépvölgyi Mészkő és Budai Márga együttes vastagsága általában 150 – 200 m (Nagymarosi, 2002a).

A kora-oligocénben a Budai-hegység egykori területén olyan tenger hullámozott, amely csak kis mértékű kapcsolatban állt a világtengerekkel (Báldi, 1983). A kora-oligocén korban ülepedett le a Tardi Agyag Formáció, amely a tengerfenék oxigénszegény környezete miatt jellegzetesen ősmaradványszegény kőzet. Az oxigénhiányos környezet az oka a Tardi Agyag mikrorétegzettségének (laminációjának) is, ugyanis nem volt tengerfenéki élővilág, amely az üledéket átdolgozta (bioturbálta) volna. A kiscelli korszak közepén helyreállt a világtengerekkel a kapcsolat, és megszűnt az oxigénszegény környezet, így ismét megjelentek a bioturbált tengeri üledékek, a tardi rétegekből folyamatosan kifejlődő Kiscelli Agyag Formáció, amely sokkal nagyobb területen található a tardi agyagnál.

A 4-es metró nagyobbik, Ny-i része oligocén képződményekben halad. A kora-oligocénben keletkezett tardi agyag a Szent Gellért téri szakaszra és a dunai átvezetésre, a középső oligocén kiscelli agyag pedig szinte az egész budai vonalra – a Kelenföldi pályaudvartól a Szent Gellért térig- jellemző.

A budai oldalon lévő kiscelli agyag azonos kőzetkifejlődést mutat. A tengeri üledék felül agyag, lejjebb agyagmárga. Legnagyobb részben képlékeny laza üledékes kőzetként fordul elő, ritkább esetben azonban kemény, csaknem összeálló üledékes kőzetként is megtalálható, ugyanis ha nagy vastag-

ságban települ, a mélyebb (min. 20-30 m mélységben lévő) rétegei erősen kompaktálódtak, előterheltek, így jóval keményebbek. Folyamatosan, üledékhézag nélkül települ a tardi agyagra. A típusos kiscelli agyag üde állapotban szürke, kékesszürke színű, nyugodt településű, fő tömegében alig vagy nem rétegzett, ritkán pados kifejlődésű, kompakt, kagylós törésű. A 4-es metró budai nyomvonalán készült feltárások az RQD értékek alapján három zónára oszthatóak. A felső a mállott zóna, ami a kiscelli agyag felső sárga mállott rétegét jelenti, illetve ebbe a zónába sorolható a szürke kiscelli agyag felső töredezett expandált része is. A második az expandált repedezett zóna, ami a felszín alatt 10-20 m-es mélységben található, végül az expandációs határon túli zóna, közettömeg, ami már kőzetként viselkedik (Horváth et al., 2000).

A Gellért térnél, a Bartók B. u. elején a kiscelli agyag egy tektonikai zóna mentén érintkezik az alsó oligocén tardi agyaggal. Az egész összlet ritmikusan finomsávós, lemezes, helyenként leveles mikrorétegzettségű. A palás leveles, vékonypados agyag az alagútépítés során lazulásra, boltozati leválásra, omlásra hajlamos. Az agyagmárga jellegű kőzet plaszticitása általában alacsony, így törése kagylós. Ez az állapot teszi lehetővé, hogy a benne keletkezett törések lehetnek nyitottak, s így víz- és gázvezetők (Farkas et al., 1999).

A nyomvonal budai szakaszán a kiscelli ill. a tardi összletek felett kizárólag negyedidőszaki üledékek találhatók. Ezen a vonalszakaszon a hegylábi lejtőüledékek jellemzők, melyeket a szél és a hegy felől lefolyó kisebb patakok hordták ide, ill. egy részük a Duna üledéke. Ezek az anyagok jellemzően holocén agyagos, agyagos közettörmelékes ill. homokos-agyagos képződmények.

A Szent Gellért tér híd előtti területét 50 m szélességben a Kemenes utcáig 1895-ben feltöltötték. 1902-ben kezdték az egyetemi építkezést, amikor is a Duna szabályozási vonalán a területet kb. 9 m vastagságban töltötték fel. A feltöltés alatt szürkéssárga kavicsos homok van a harmadkor határáig. (Farkas et al., 1999)

## 5.2 Hidrogeológia

A nyomvonal budai oldalán szoros értelemben vett talajvíz, nagyobb kiterjedésben és mennyiségben csak a pleisztocén rétegekben jelenik meg (GEOVIL, 2005b). A nyílt tükrű talajvíz megjelenésére a nyomvonal teljes hosszában számítani kell. A talajvizet tározó összlet fekvésében, több száz méter vastag harmadidőszaki, önmagukban vízzáró agyagrétegek találhatók. A rétegvíz jelenléte tehát elviekben nem jellemző. Azonban az önmagában vízzárónak tekinthető szürke agyag vízáteresztővé válhat a tagoló rendszerek (törések, repedések) mentén. A területre jellemzők a vetők, melynek a fő irányai ÉNY-DK, É-D és KDK-NYÉNY. A nyugati szellőző alagútban az alagút kihajtáskor az alagút tengelyével párhuzamos vetősíkot találtak, az állomás építésekor 2007 őszén pedig egy, a Dunával közel párhuzamos 45°-os dőlésű, a kiscelli agyagot erősen elnyíró sík volt látható (BME, 2008).

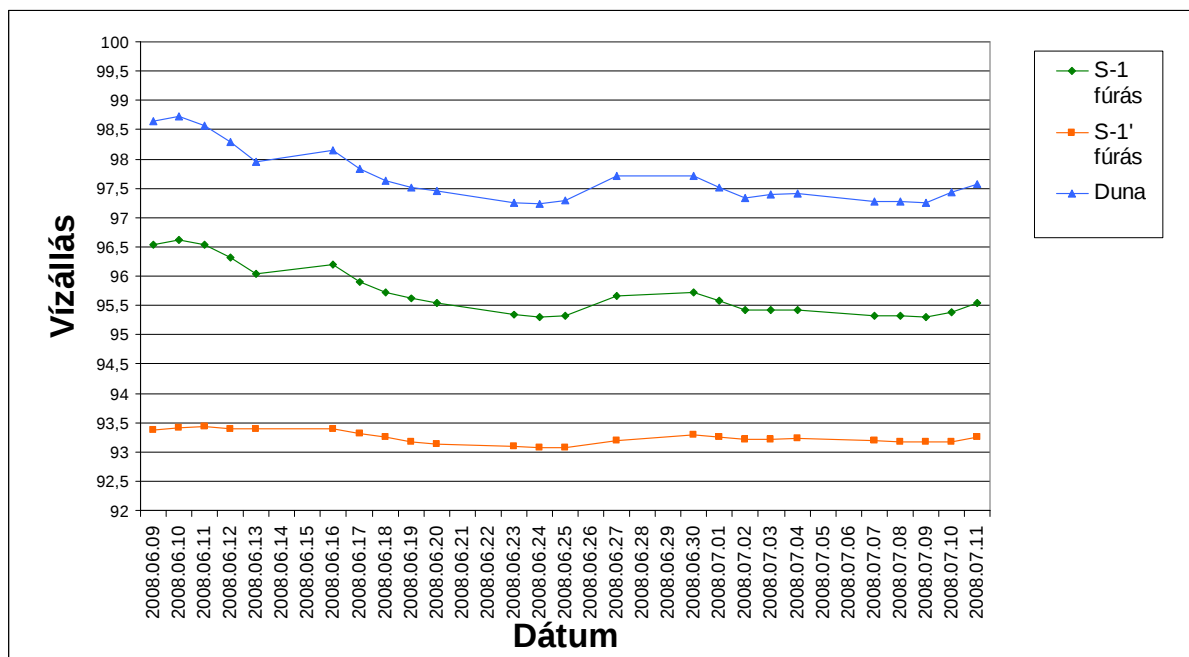
A talajvíz áramlásának egyik fő iránya a Duna, mint erózió bázis felé történő szivárgás (a Duna galériaként gyűjti magába a talajvizet). A felszín alatti vizek másik fő iránya a Duna völgyére jellemzően É-D-i irányú.

A 4-es metró építésével kapcsolatos környezeti hatások megfigyelésére karszt-, talaj- és rétegvíz megfigyelő monitoring rendszert alakítottak ki. A monitoring hálózatot a Mélyépterv –Mecsekérc-Soldata Konzorcium üzemelteti, melynek kiépítése során számos vízszint- és hőmérsékletmegfigyelő kút létesült, illetve már meglévő kutakat és forrásokat vontak be az egész nyomvonal területén.

Az észlelőkutak görbéi túlnyomórészt követik a Duna állását (2. ábra), mivel a Duna vízállása hatással van a környezetében lévő teraszréteg vízállására is.

A Gellért téri állomás és az alagutak a Gellért hegy déli előterében közel kerülnek Budapest egyik legértékesebb gyógyfürdőcsoportjának vízbázisához. A budai termálkarsztrendszer a Dunántúli középhegység felszín alatti vízrendszerének része, mely alaphegység jellegű triász karbonátos kőzetekből épül fel.

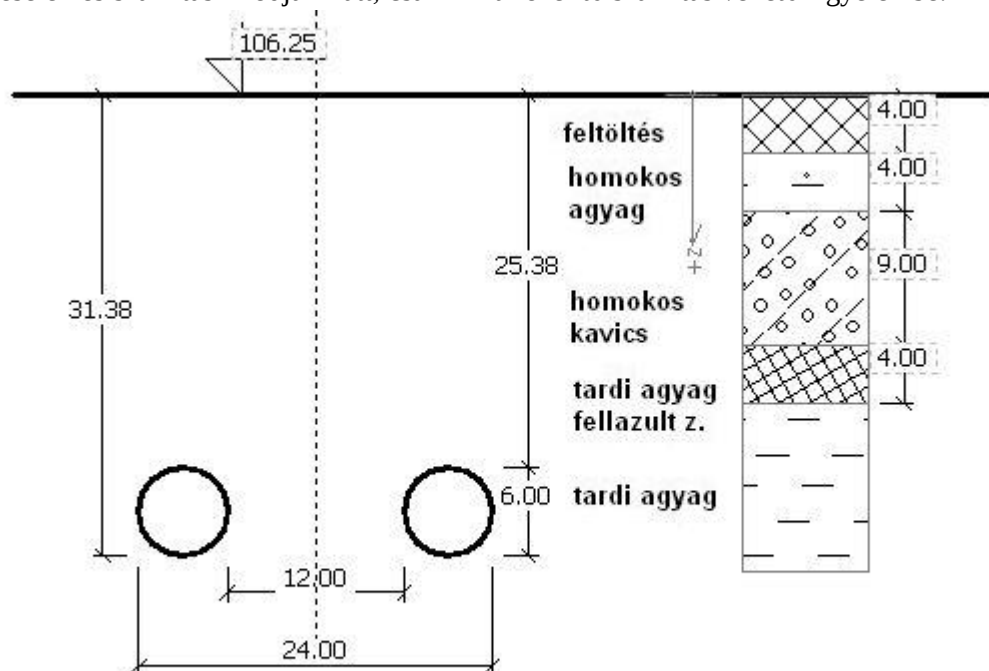
A vízkémiai adatok alapján a Gellért téri alagút homlokfaláról származó vízminták nagyon hasonlóak a Gellért fürdő térségében található karsztvíz kutak vizének összetételéhez. Ez arra is utalhat, hogy a talajvíz kommunikál a karsztvízzel és kis mértékben karsztvíz keveredhet a talajvízhez (BME, 2008). Ennek további bizonyítéka lehet, hogy a peronalagútnál összegyűjtött víz hőmérséklete 18°C-ra adódott, a tiszta talajvíz hőmérséklete azonban a szakirodalom és egyéb gyakorlati tapasztalatok alapján 12-13°C körüli (BME, 2008). Ez tehát arra enged következtetni, hogy a talajvízhez melegebb víz keveredhet. A Gellért téri karsztvíz megfigyelő kútban és a Gellért fürdőben azonban sem minőségi, sem mennyiségi változás nem jelentkezett a metróépítés kezdete óta.



2. ábra: Az BME kertben lévő két (S-1 talajvízfigyelő, S-1' rétegvízfigyelő) kút vízszintjeinek és a Duna vízállásának kapcsolata

## 6 BEMENŐ ADATOK, TALAJMECHANIKAI PARAMÉTEREK

A Depression modul a terepsüllyedések számítására kifejlesztett alkalmazás, egyszerűsége és nem végeselemes számítási módja miatt, csak mint közelítő számítás vehető figyelembe. A különböző talaj

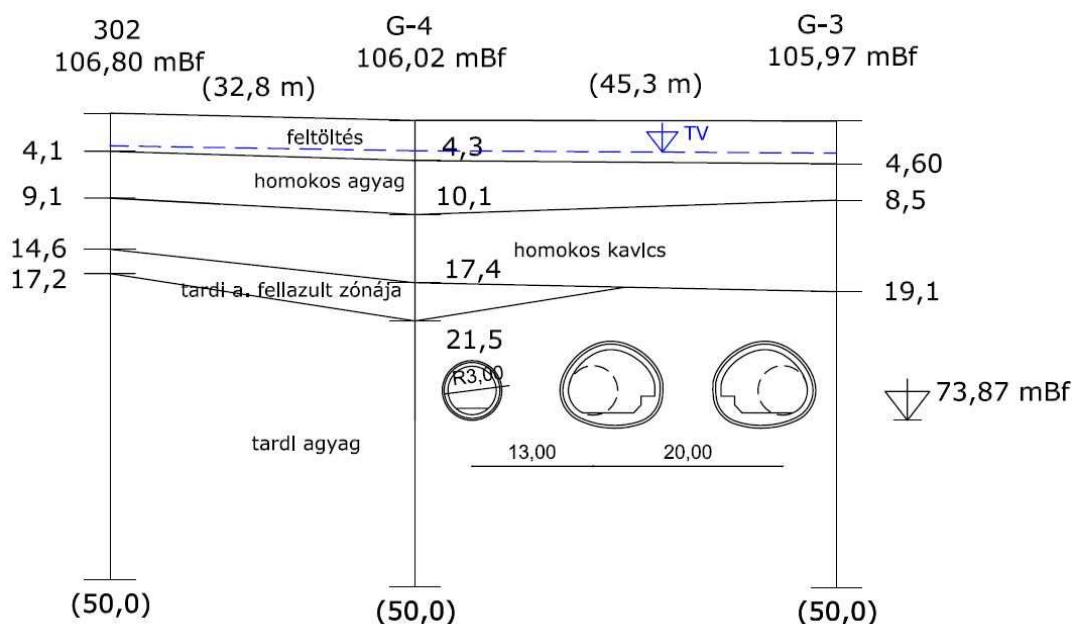


3. ábra: A Depression-be bevitt geotechnikai modell

A program sajnos nem ad lehetőséget a keresztmetszvényekben lévő talaj kifejtésének fázisokban történő modellezésére. Az épületteherrel is ugyanabban a fázisban kell számolni. A számítás során a talajfizikai jellemzők közül csak a belső súrlódási szöget és a nedves térfogatsúlyt lehet megadni, ill. a tardi agyag (a réteg amiben az alagút halad) rugalmassági modulusát, más adatot nem használ a számításnál.

A Tunnel modul használatához a területen felvettünk egy metszetet, amely a BME CH épülete alatt helyezkedik el. A terület rétegződését a régebben mélyített fúrások és a 2008 nyarán nyert minták eredményeiből adtuk meg a modell megalkotásához. Itt egyszerűsítésre volt szükség, hogy a program dolgozni tudjon vele (4. ábra).

A-A metszet



4. ábra: Az alagutak keresztmetszévény a modellben alkalmazott talajrétegződéssel

A számítások során a Ch épületet felszíni sávós eloszlású teherként modelleztük. Egy általános rétegrend felvételével az épület teljes terhe 100 kPa-ra adódott.

A programban alkalmazott talajfizikai jellemzők meghatározásához az elmúlt évtizedekben a Gellért téren mélyült fúrások fúrászelvényeinek nagy részét fizikai jellemzőikkel együtt összegyűjtöttük, az adatokat összegeztük, statisztikai számításokat végeztünk. A legtöbb adatot a tardi agyagról sikerült összegyűjteni, hiszen a Gellért téren a jelen lévő vetőzónának köszönhetően ez az agyagfajta uralkodik, a metró állomás is ebbe a talajba mélyült. A tardi agyag jellemzőit tartalmazó táblázat (2. táblázat) értékeiből jól látszik, hogy a talajfizikai paraméterek meghatározása során nagy szórás adódott. Így három különböző talajállapotot modellezése mellett döntöttünk: maximális, átlagos és minimális értékekkel számolva (3-5. táblázatok). A talajfizikai jellemzők közül a súrlódási szög, a kohézió és a rugalmassági modulus értékeit változtattuk.

2. táblázat: Tardi agyag fizikai jellemzőinek statisztikai paraméterei

| Adattípus                 |                                     | darabszám | átlag | szórás | min.  | medián | max.  |
|---------------------------|-------------------------------------|-----------|-------|--------|-------|--------|-------|
| víztartalom               | w [%]                               | 78        | 10,8  | 2,7    | 6,5   | 10,5   | 25,1  |
| plasztikus index          | I <sub>p</sub> [%]                  | 45        | 19,7  | 4,8    | 9,7   | 20,0   | 30,8  |
| térfogatsűrűség           | $\rho_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]       | 78        | 2353  | 132    | 1940  | 2350   | 3050  |
|                           | $\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]       | 48        | 2139  | 135    | 1830  | 2150   | 2800  |
| hézagtényező              | e [-]                               | 47        | 0,30  | 0,06   | 0,21  | 0,29   | 0,50  |
| telítettség               | S <sub>r</sub> [-]                  | 40        | 0,90  | 0,07   | 0,74  | 0,90   | 1,00  |
| összenyomódási modulus    | E <sub>s</sub> [MN/m <sup>2</sup> ] | 3         | 8,8   | 5,6    | 3,1   | 9,1    | 14,29 |
| súrlódási szög            | $\phi$ [°]                          | 15        | 24,5  | 6,7    | 14,0  | 26,0   | 35    |
| kohézió                   | c [kPa]                             | 16        | 398,0 | 266,1  | 10,6  | 360,0  | 830   |
| egyirányú nyomószilárdság | $\sigma_{co}$ [MPa]                 | 31        | 2,172 | 1,668  | 0,150 | 1,830  | 8,690 |
| rugalmassági modulus      | E <sub>0</sub> [MPa]                | 17        | 249,6 | 216,3  | 76,0  | 136,0  | 843   |

**3. táblázat:** Maximális értékű talajfizikai jellemzők

| Talaj megnevezése            | Súrlódási szög, $\varphi$ [°] | Kohézió, $c$ [kPa] | Nedves térfogatsúly, $\rho_n$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Rugalmassági modulus, $E$ [MPa] | Poisson tényező, $\nu$ [-] | Dilatációs szög, $\psi$ [°] |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Feltöltés                    | 18                            | 5,0                | 19,0                                               | 10                              | 0,30                       | 0                           |
| Homokos agyag                | 27                            | 28,0               | 21,0                                               | 25                              | 0,35                       | 0                           |
| Homokos kavics               | 38                            | 0,0                | 20,0                                               | 70                              | 0,25                       | 8                           |
| Tardi agyag fellazult zónája | 28                            | 130,0              | 22,0                                               | 90                              | 0,30                       | 0                           |
| Tardi agyag                  | 35                            | 800,0              | 23,5                                               | 800                             | 0,25                       | 5                           |

**4. táblázat:** Átlagos értékű talajfizikai jellemzők

| Talaj megnevezése            | Súrlódási szög, $\varphi$ [°] | Kohézió, $c$ [kPa] | Nedves térfogatsúly, $\rho_n$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Rugalmassági modulus, $E$ [MPa] | Poisson tényező, $\nu$ [-] | Dilatációs szög, $\psi$ [°] |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Feltöltés                    | 17                            | 5,0                | 19,0                                               | 8                               | 0,30                       | 2                           |
| Homokos agyag                | 24                            | 28,0               | 21,0                                               | 21                              | 0,35                       | 3                           |
| Homokos kavics               | 33                            | 0,0                | 20,0                                               | 45                              | 0,25                       | 8                           |
| Tardi agyag fellazult zónája | 26                            | 90,0               | 22,0                                               | 75                              | 0,30                       | 3                           |
| Tardi agyag                  | 25                            | 400,0              | 23,5                                               | 250                             | 0,25                       | 5                           |

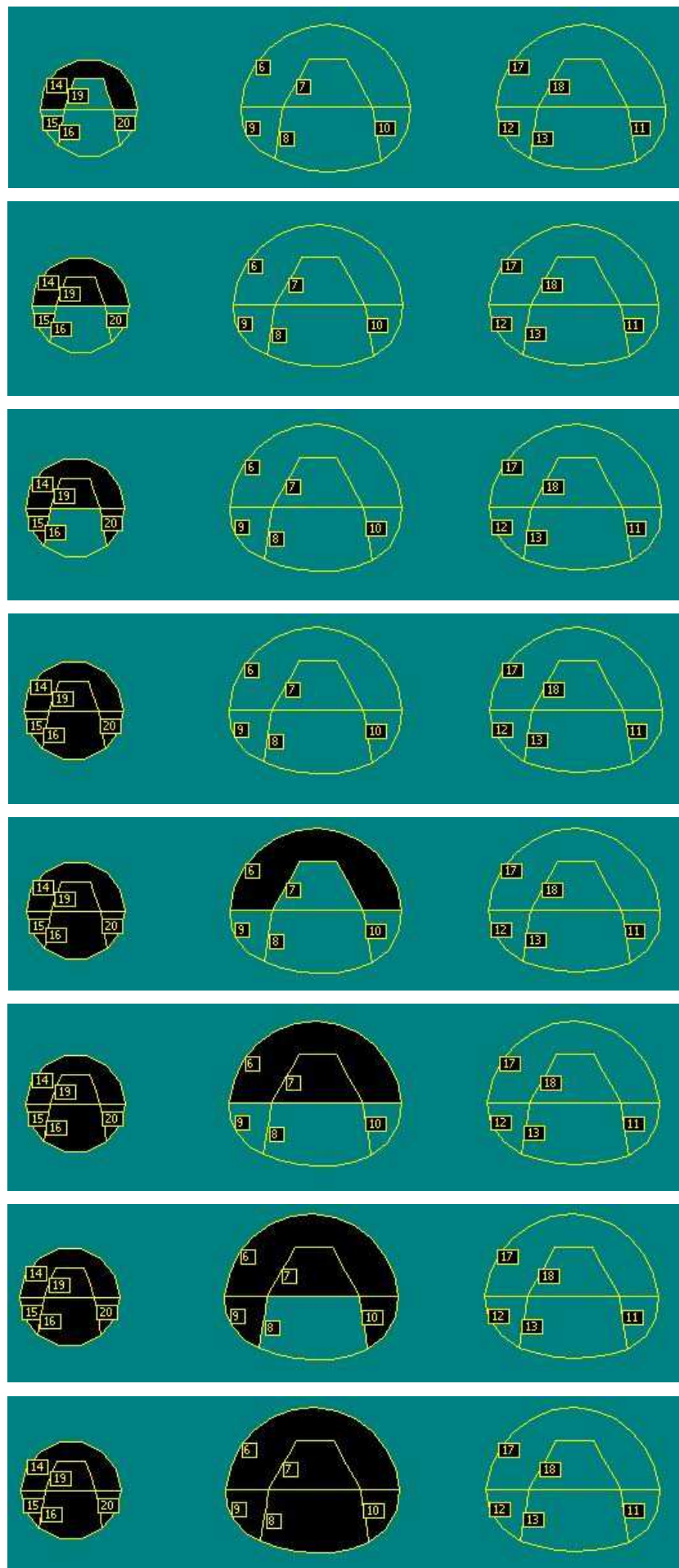
**5. táblázat:** Minimális értékű talajfizikai jellemzők

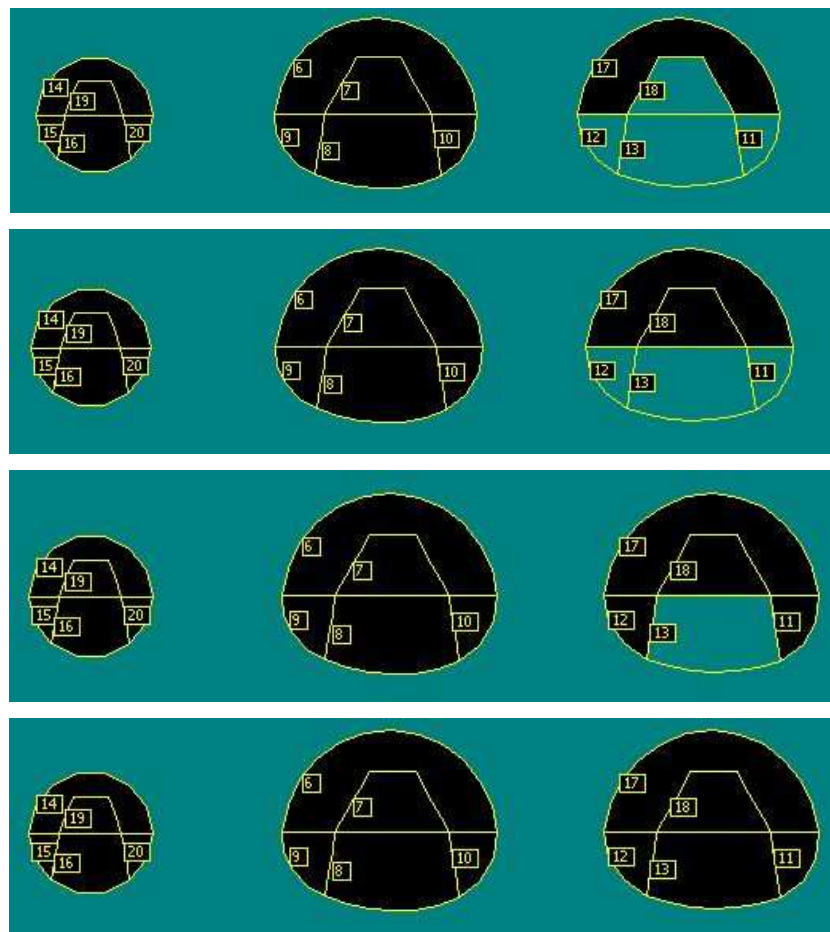
| Talaj megnevezése            | Súrlódási szög, $\varphi$ [°] | Kohézió, $c$ [kPa] | Nedves térfogatsúly, $\rho_n$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Rugalmassági modulus, $E$ [MPa] | Poisson tényező, $\nu$ [-] | Dilatációs szög, $\psi$ [°] |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Feltöltés                    | 16                            | 5,0                | 19,0                                               | 5                               | 0,30                       | 2                           |
| Homokos agyag                | 21                            | 28,0               | 21,0                                               | 17                              | 0,35                       | 3                           |
| Homokos kavics               | 28                            | 0,0                | 20,0                                               | 20                              | 0,25                       | 8                           |
| Tardi agyag fellazult zónája | 24                            | 50,0               | 22,0                                               | 60                              | 0,30                       | 3                           |
| Tardi agyag                  | 15                            | 170,0              | 23,5                                               | 100                             | 0,25                       | 5                           |

A modell elkészülte után a szoftver előállítja a véges elemes hálózatot, amely jelen esetben 6 csomópontú háromszögekből épül fel. A hálógeneráláskor az alagutak keresztmetszévényeiben a háló sűrítésére került sor, az előzőleg megadott utasítás alapján.

Az alagutakat a modellben több fázisban, az új osztrák alagútépítési eljárás módszere szerint emeltük ki. Először a szellőző alagút, majd az északi és a déli peronalagút kihajtása következett. Egy-egy alagút bontása a főteszelvénnyel kezdődött, majd az oldalszelvénnyel és a magszelvénnyel folytatódott (5. ábra).

Egy-egy szelvényrész kibontása után egy löttbetonos külső falazat elkészítése következik. Ezt a réteget a programban található gerendaelemek alkalmazásával modelleztük. A keresztmetszet a külső lövelt beton elkészítése után és a végleges vasbeton falazat beépítése előtt, az ideiglenes megtámasztás állapotában, lehetővé teszi a pajzsok átvontatását. Erről az ideiglenes állapotról készítettük a modellt.

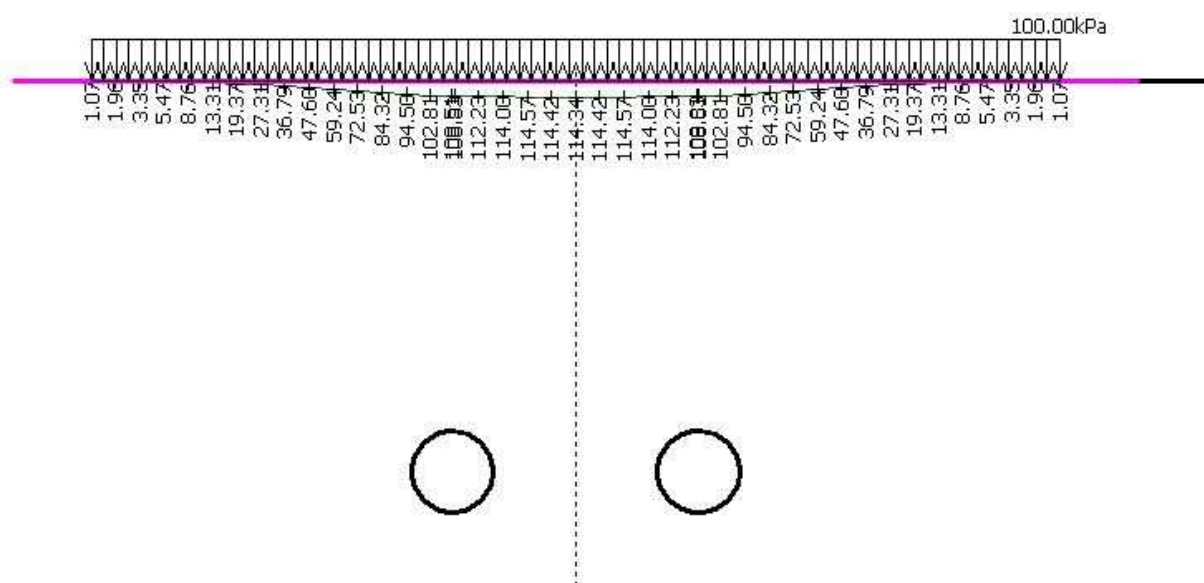




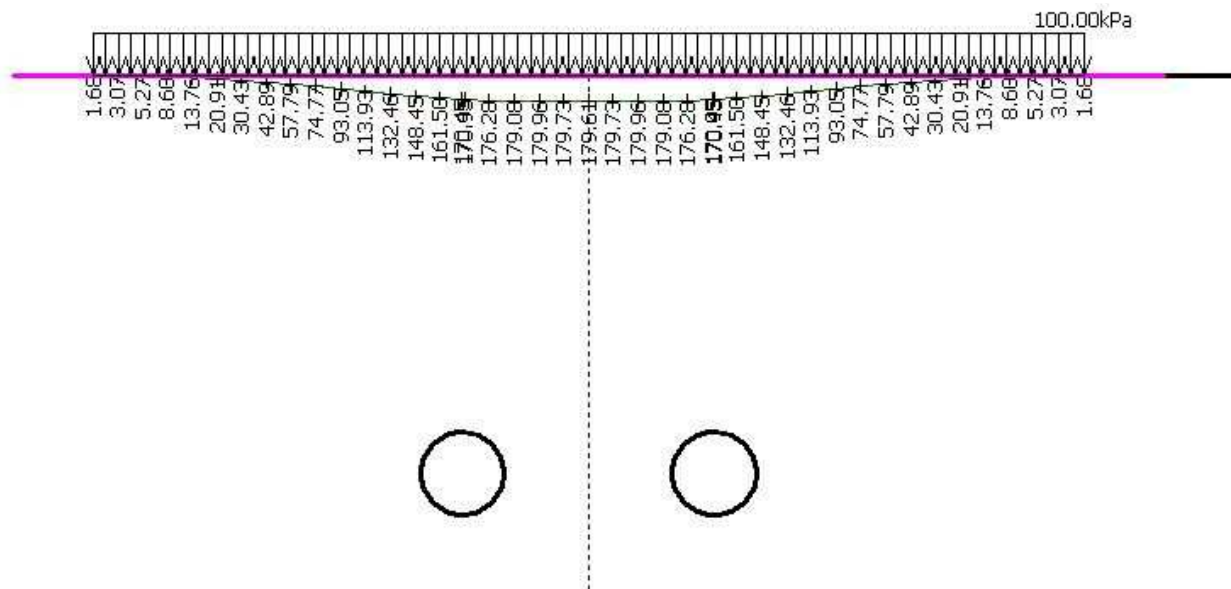
5. ábra: Az alagutakból való földkiszedés lépései az új osztrák alagútépítési módszer szerint

## 7 EREDMÉNYEK

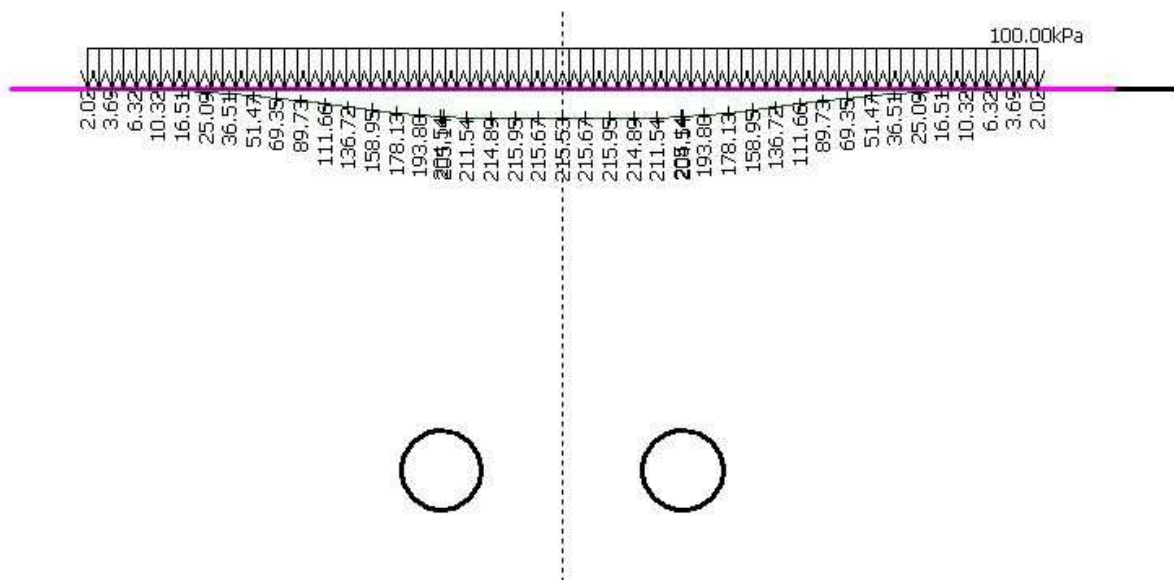
A Depression modulban a süllyedés számítása három elmélettel történik: Limanov, Fazekas és Peck elmélete alapján. A süllyedések Fazekas módszerével adódtak a legkisebbre, Peck elmélete alapján pedig a legnagyobbra (6-8. ábra). Ezek szerint a maximális felszíni süllyedések rendre: 11,4 cm, 18,0 cm ill. 21,6 cm.



6. ábra: Felszínsüllyedés számítás eredménye Fazekas módszerével



7. ábra: Felszínsüllyedés számítás eredménye Limanov módszerével



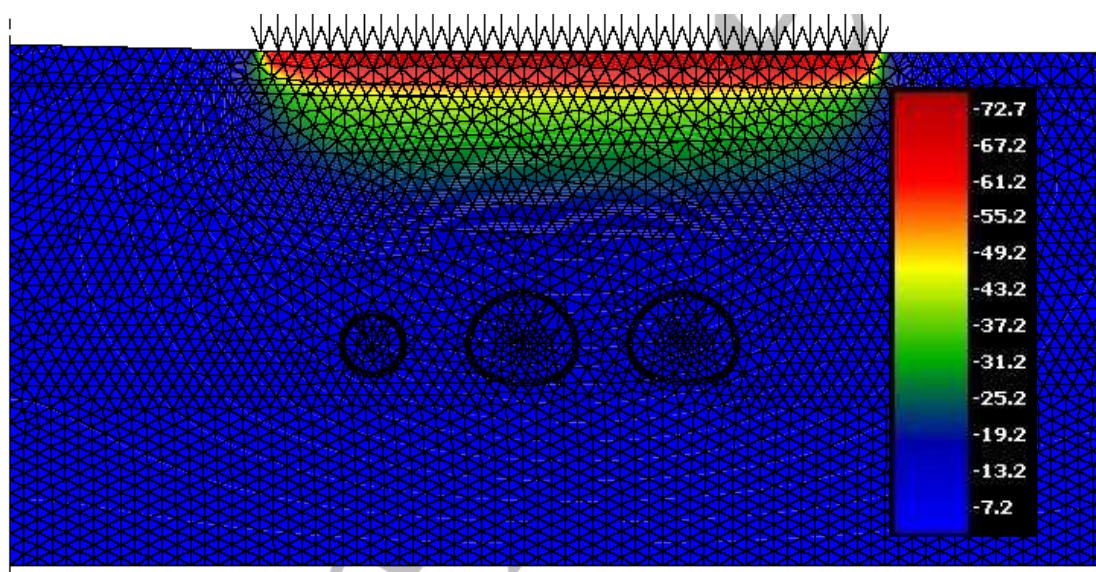
8. ábra: Felszín süllyedés számítás eredménye Peck módszerével

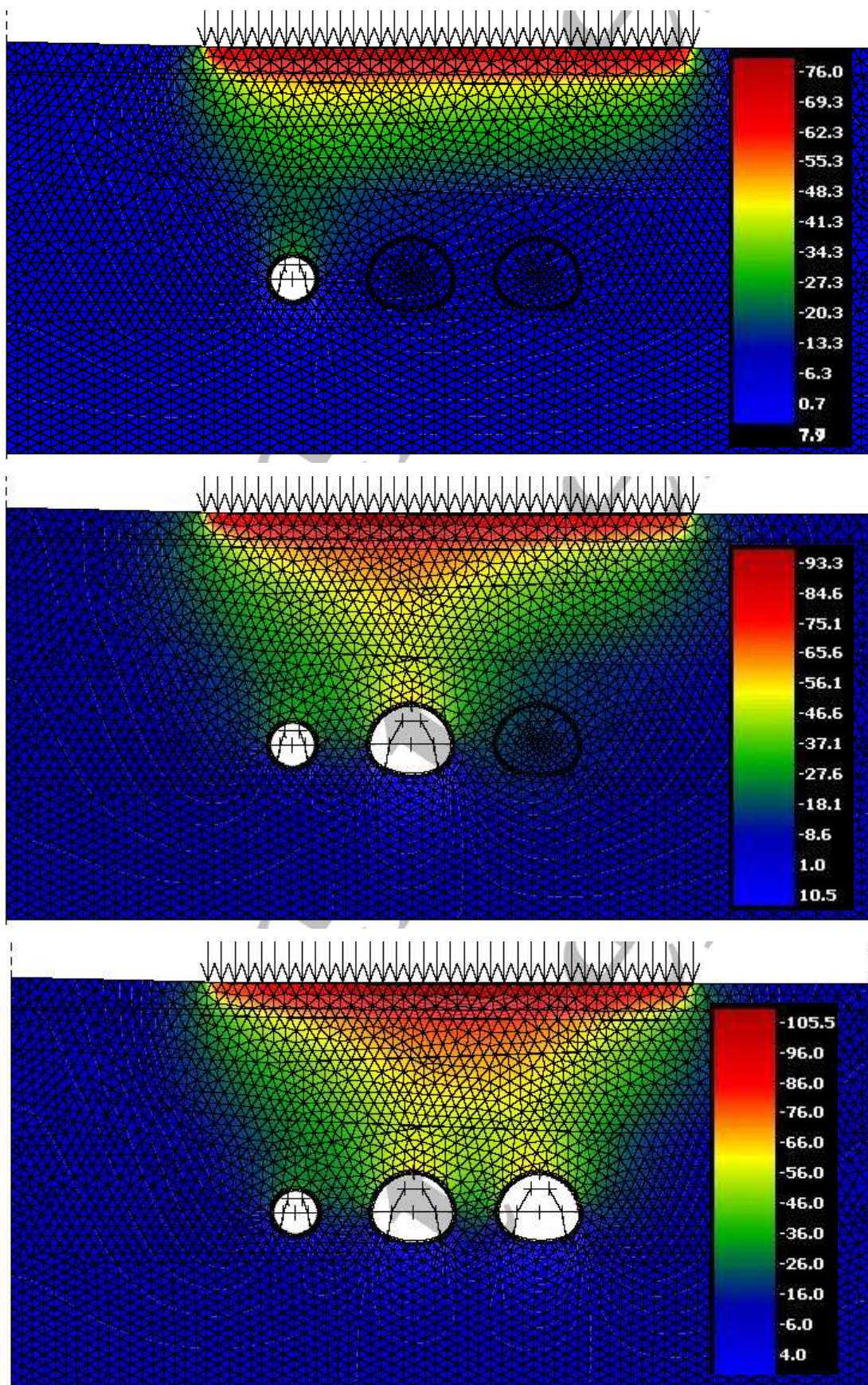
A végeselemes számítást tehát a bemenő adatok megválasztása szempontjából három különböző esetre végeztük el. A talajfizikai paraméterek statisztikai feldolgozásával kapott minimális és maximális illetve az átlagértékeket alkalmaztuk. Egy alagút számítását 7 lépésben végeztük a technológia szerint (új osztrák alagútépítési módszer) és minden lépésben meghatároztuk a süllyedéseket. Az első terhelési fázis még az alagút számítása előtt a felszíni teherből keletkező már kialakult süllyedés meghatározása volt, ezzel ugyanis csökkenteni kell a számított süllyedéseket, hogy kizárólag az alagútépítés következtében létrejövő felszínsüllyedés meghatározható legyen.

A számítások eredményeit táblázatokba foglaltan közöljük (6. táblázat), illetve néhány jellemző süllyedés ábrát is bemutatunk (9-10. ábrák). A táblázatokban feltüntettem az épületteherből adódó süllyedést (ez volt az első terhelési fázis), majd az épületteherből és az alagútépítésből együttesen származó elmozdulásokat. A két számsor különbségéből kiszámíthatók a kizárólag az alagútépítés miatt fellépő süllyedések a felszínen és az alagutak főtéjében is.

**6. táblázat:** Süllyedés eredmények

|                         | Lépések száma | Süllyedés értékek [cm] |                     |                  |
|-------------------------|---------------|------------------------|---------------------|------------------|
|                         |               | max. paraméterek       | átlagos paraméterek | min. paraméterek |
| szellőző alagút bontása | 1             | 0,1                    | 0,7                 | 1,6              |
|                         | 2             | 0,1                    | 0,7                 | 1,6              |
|                         | 3             | 0,1                    | 0,7                 | 1,6              |
|                         | 4             | 0,2                    | 0,8                 | 1,9              |
|                         | 5             | 0,2                    | 0,8                 | 1,9              |
|                         | 6             | 0,2                    | 0,8                 | 1,9              |
|                         | 7             | 0,2                    | 0,9                 | 1,9              |
| északi alagút bontása   | 8             | 0,6                    | 2,8                 | 25,3             |
|                         | 9             | 0,6                    | 2,8                 | 25,3             |
|                         | 10            | 0,6                    | 2,8                 | 25,3             |
|                         | 11            | 0,7                    | 3,1                 | 26,2             |
|                         | 12            | 0,7                    | 3,1                 | 26,2             |
|                         | 13            | 0,7                    | 3,1                 | 26,2             |
|                         | 14            | 0,7                    | 3,1                 | 26,2             |
| déli alagút bontása     | 15            | 1,0                    | 2,8                 | 42,8             |
|                         | 16            | 1,0                    | 2,8                 | 42,8             |
|                         | 17            | 1,0                    | 2,8                 | 42,8             |
|                         | 18            | 1,1                    | 3,2                 | 43,6             |
|                         | 19            | 1,1                    | 3,2                 | 43,6             |
|                         | 20            | 1,1                    | 3,2                 | 43,6             |
|                         | 21            | 1,1                    | 3,2                 | 43,6             |

**9. ábra:** Teherből származó süllyedések átlagos talajfizikai paraméterek esetén



**10. ábra:** Alagutak kifejtésekor fellépő süllyedések átlagos talajfizikai paraméterek esetén

## 8 EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE, KÖVETKEZTETÉSEK

A három különböző futtatás a minimális, maximális és átlagos talajfizikai paraméterekkel nagyon különböző eredményeket adott: a süllyedések rendre 43,6 cm, 1,1 cm és 3,2 cm. A minimális jellemzők esetén számolt érték irreálisan nagy, ez a Ch épületben valószínűleg el nem viselhető károsodást

okozna. Az átlagos paraméterek alkalmazásakor a felszínsüllyedés 3,3 cm-re adódott, mely annak ellenére, hogy középértékekkel számoltam, jóval közelebb van a maximális jellemzőknél számolt értékhez. Ez a 3,3 cm-es süllyedés fogadható el a legrealisabbnak, mert az alagútfejtés során tapasztalt valódi süllyedés 4,2 és 5,9 cm között volt. Ez a különbség a talajfizikai paraméterek szélsőértékeinek alkalmazása mellett abból is adódhat, hogy nem állt minden süllyedést okozó tényező a rendelkezésünkre, nem volt elég információnk az építési folyamat pontos lépéseiről.

A Depression program egyes eredményei nagyságrendben hasonlítanak a Tunnelben kapott eredményekhez. Az átlagos értékekkel való számítás esetén az épületteherből és az alagútépítésből származó együttes süllyedés 10,6 cm-re adódott, míg a Fazekas elmélete alapján számolt süllyedés 11,4 cm-nyi. Azonban pl. a Peck módszerével számolt süllyedés ennek majdnem a kétszerese 21,6 cm.

Bár jelen esetben az egyszerűbb (Depression) programmal számított eredmények túlzott süllyedéseket mutattak, azonban hasonló problémák elemzésekor mindenképpen hasznos több számítási módszer alkalmazása. Ez nagyban segíti az adott probléma folyamatának megismerését.

A talajok laboratóriumi és helyszíni vizsgálatokkal meghatározott talajfizikai paramétereiből nem egyszerű egy geotechnikai modell számára jó bemenő adatokat létrehozni. Általában ezek a mért fizikai paraméterek tág határok között mozognak, és a modellben egy-egy rétegnek egy-egy paramétert vagyunk kénytelenek megállapítani. Számításaink is rámutatnak arra, hogy a vizsgálati eredményekből különbözően meghatározott bemenő adatok alkalmazása milyen nagy különbségeket okoz a vég-eredményekben.

Fontos megjegyezni, hogy a süllyedés számításoknál alkalmazott modelleknél a felszín alatti vizek hatását nehéz figyelembe venni, mert a modell csak a talajfizikai paraméterek változásával számol, a víztartalmi jellemzők külön input adatként nem vihetők be. Ennek megfelelően a talajvíz vagy az egyéb felszín alatti víz szintjének változása, mint a süllyedést közvetlenül befolyásoló tényező csak közvetve vehető figyelembe, azaz a rugalmassági modulus, sűrűlási tényező és a kohézió értékének változtatásával.

Az épület megépítése óta eltelt több, mint száz év süllyedés történetéről részletes adatsorok csak az utóbbi évekből állnak rendelkezésre, a korábbi feljegyzések szórványos adatokat szolgáltatnak. Mindezek alapján a történeti időkben lezajlott épületmozgásokat nehéz kronológiailag modellezni, és ezek hatása a napjainkban lezajló süllyedéshez hozzáadódik. A metró építéssel összefüggésben dokumentált süllyedések megítélésekor - a hatásmechanizmus pontos megállapításához - érdemes lenne a történeti adatokat is figyelembe venni.

Az egyes alagutak építésénél a süllyedések legnagyobb része már a főte kibontása után lejártszódot, a későbbi munkafázisokban keletkező többletsüllyedések már csaknem elhanyagolható mértékűek voltak.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozunk dr. Kleb Bélának a szakmai tanácsokért. Emszt Gyula, Árpás Endre László, Bodnár Nikolett és Nagy Zsolt technikai segítségéért hálásak vagyunk.

## 9 IRODALOM

- Báldi T. 1983: *Magyarországi oligocén és alsómiocén formációk*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 293 p.
- BME, Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tsz., Mérnökgeológia Tanszéki Csoport 2008: *Tájékoztató jellegű hidrogeológiai szakvélemény a Gellért téri állomás térségének vízföldtani jellemzői, vízminták és helyszíni bejárás tapasztalata alapján*
- Farkas J., Müller M., Horváth Gy., Móczár B., Pusztai J., Bíró V. 1999: Budapest jellemző altalajviszonyai az eddigi leghosszabb vonalas feltárás tapasztalatai alapján. *Közúti és Mélyépítési Szemle*, **49**(5): 199-207.
- Geovil Kft. 2005a: Budapest 4. metróvonal, I. szakasz, *Összefoglaló mérnökgeológiai, hidrogeológiai és geotechnikai szakvélemény, „A” kötet*, Természetföldrajzi és földtani adottságok a nyomvonal mentén
- Geovil Kft. 2005b: Budapest 4. metróvonal, I. szakasz, *Összefoglaló mérnökgeológiai, hidrogeológiai és geotechnikai szakvélemény, „B” kötet*, BUDAI OLDAL - 00+00 - 39+72 jvsz.
- Hegyi J., Kiss E. Z., Szlabóczky P. 1981: Általános földtani eredmények a budapesti metró vonalak földtani kutatásaiból, *Általános földtani szemle*, **16**: 5-24.
- Horváth T., Fáy M., Sándor Cs. 2000: *A metróvonal mérnökgeológiai adottságai*. Földtani Kutatás, **37**(2): 35 – 44.
- Nagymarosi A. 2002: Magyarországi eocén. In Karátson D. (szerk.) *Magyarország földje - kitekintéssel a Kárpát-medence egészére*. Magyar Könyvklub, 102-122.