

### **3. melléklet**

## **Geológiai és hidrogeológiai képződmények**

**TARTALOMJEGYZÉK**

<b>GEOLOGIAI ÉS HIDROGEOLOGIAI KÉPZŐDMÉNYEK.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Alapvető geológiai és szeizmológiai információk.....</b>	<b>2</b>
1.1. Az adatbázis .....	2
1.2. A telephely geológiai jellemzése.....	2
1.3. Geomorfológia, felszínképződés.....	4
1.4. Alapvető tektonikai és szeizmológiai jellemzés.....	6
<b>2. A telephely földrengés veszélyeztetettsége .....</b>	<b>11</b>
<b>3. Felszínre felnyúló törések .....</b>	<b>24</b>
<b>4. A mikroszeizmikus monitorozás összefoglaló értékelése.....</b>	<b>26</b>
<b>5. A telephely mérnökgeológiai és talajtani viszonyai.....</b>	<b>33</b>
<b>6. Hidrogeológiai képződmények.....</b>	<b>63</b>
6.1. A hidrogeológiai viszonyok leírása.....	64
6.2. Vízhasználat és vízbázisok.....	69
6.3. A „Környezetvédelmi-, telephely- és vízjogi engedélyezési kérdésekhez kapcsolódó telephely-jellemzési program felszín alatti vizek hasznosítási lehetőségeivel foglalkozó monitoring alprogram” 2003 első felében értékelhető eredményei .....	73
6.4. Az atomerőmű hidrológiai környezetének vizsgálata modell segítségével .....	77

## GEOLÓGIAI ÉS HIDROGEOLÓGIAI KÉPZŐDMÉNYEK

A paksi telephely kiválasztása a hatvanas évekre jellemző ipartelepítési gyakorlatot követte, mindenekelőtt a létesítmény építésének és üzemeltetésének műszaki-gazdasági feltételei, szociális és politikai szempontok játszottak szerepet, s – a gyepüelvtől eltekintve – kevésbé az atomerőmű biztonságát befolyásoló természeti tényezők kedvező volta.

A műszaki tervezés a hetvenes évek elején kezdődött, amelyhez az akkori szovjet gyakorlatnak megfelelően vizsgálni és minősíteni kellett a telephelyre jellemző földtani, szeizmológiai viszonyokat. A tervezés adatigényét az akkori szovjet szabályozás szerint a SNiP II-A.12-69 szabvány határozta meg. Az akkori előírások teljesítése nem igényelt kiterjedt földtani, tektonikai, szeizmológiai vizsgálatokat.

Az 1977. évi Vrancea-i nagy földrengést követően, s mindinkább a nyolcvanas években a szovjet szabályozás fejlődött, szigorúbbá vált és specifikus földtani vizsgálatokat, a telephely szeizmicitásának alaposabb értékelését írta elő. A Paksi Atomerőmű tervezése idején már érvényes volt a Szovjetunióban a VSN 15-78 számú ideiglenes norma, amely az atomerőművek földrengésre való tervezését a nemzetközi gyakorlathoz hasonlóan kezelte. A szovjet szabályozás változása azonban alig hatott a Paksi Atomerőmű tervezésére, a telephely korszerű követelményeknek megfelelő, komplex földtani értékelése, a telephelyre jellemző mértékadó földrengés meghatározása csak 1996. januárjában fejeződött be.

Az atomerőmű telepítése és tervezése idején lényegében nem volt hazai előírás az atomerőművi telephely földtani viszonyainak vizsgálatára és a megfelelő tervezési input meghatározására. Az 1979-ben kiadott Atomerőművi Biztonságtechnikai Szabályzatok (ABSZ) deklaráta ugyan a telephelyre jellemző környezeti hatásokkal szembeni biztonság és adekvát tervezés követelményét, de ezt például még az ABSZ igen részletes 4. kötetében sem konkretizálták. A Nemzetközi Atomenergetikai Ügynökség 1979-ben publikálta az 50-SG-S1 és 50-SG-S2 biztonsági irányelveit, amelyek a telephely minősítés és a földrengés-biztos tervezés követelményeit foglalták össze. Az irányelvek megjelenése befolyásolta a hazai biztonsági szemléletet, de a dokumentumok – jogi státusuk miatt – csak tájékoztató jellegűek voltak.

A paksi telephely földtudományi újraértékelése, a telephely minősítése és a mértékadó földrengés meghatározása, ami 1986. és 1996. között zajlott, specifikus hazai szabályozás híján a NAÜ által közvetített nemzetközi gyakorlatot és szabályozást követte.

A szabályozási folyamat 1996. decemberétől, az 1996. évi CXVI. törvény „Az atomenergiáról” megjelenésétől a paksi telephely földtudományi újraértékelése után indult. Jóllehet a paksi telephely földtudományi újraértékelése épp megelőzte az 1997-ben indult hazai szabályozási folyamatot, megállapítható, hogy az alábbiakban összefoglalt földtudományi értékelés, mind a vizsgálati módszerek, a kritériumok és a következtetések vonatkozásában az érvényes hazai szabályozásnak megfelel. Ez köszönhető annak, hogy a telephely földtudományi újraértékelése és az új hazai szabályozás azonos nemzetközi mintákat, mindenekelőtt a NAÜ irányelveit követte.

## 1. Alapvető geológiai és szeizmológiai információk

### 1.1. Az adatbázis

A telephely földtani jellemzése a rendelkezésre álló irodalmi forrásokon túl, az 1986-96. között végzett céltudatos kutatások eredményeire épül.

A kutatások

- a nagy régió, 320 km sugarú kör a telephely körül
- a régió, 80 km sugarú kör a telephely körül
- a telephely tágabb környezete, 20 km sugarú kör a telephely körül
- a telephely környezete, 5 km sugarú kör a telephely körül
- a telephely, 1 km sugarú kör a telephely körül

felbontásban zajlottak.

A vizsgálat a NAÜ 50-SG-S1 (Rev 1) szerint

- geológia,
- geomorfológiai,
- geofizikai,
- neotektonikai,
- szeizmológiai

adatokra épült a térség csökkenésével egyre növekvő felbontásban 1:1.000.000-ós léptéktől az 1:1000-es léptékig, kiegészítve még a IV.-es és V. régióban a hidrológiai, hidrogeológiai és részletes geotechnikai feltárás adataival is.

A főbb adatokat, az adatok különböző interpretációját, az értelmezések szintézisét az összefoglalását

- az OVE ARUP cég által az Európai Közösség PHARE Regional Programme for Nuclear Safety 4.2.1 VVER 440-213 Seismic Hazard Reevaluation c. projektje keretében a Paksi Atomerőmű telephelye szeizmikus veszélyeztetettsége tárgyában végzett vizsgálatairól szóló, kétkötetes angol nyelvű jelentés, valamint
- az 1997-ben Marosi Sándor és Meskó Attila akadémikusok szerkesztésében az Akadémiai Kiadónál „A Paksi Atomerőmű földrengésbiztonsága” c. alatt megjelent, de a paksi telephely földtudományi értékeléséről szóló monográfia [1].

tartalmazza. A teljes kutatási anyag többszáz-tételes bibliográfiája a fenti két összefoglalóban megtalálható.

### 1.2. A telephely geológiai jellemzése

Az erőmű térségében az alaphegység mélysége a Paks-2 sz. fúrás és a geofizikai vizsgálatok szerint a felszínhez viszonyítva mintegy 1600-1700 m. A kőzetfejlődésről rendelkezésre álló információk köre nem teljes, a mai ismeretek szerint a területen a mélymedence-aljzatot a Mecsek-környéki területekről ismert, gránitosodott metamorf képződmények, valamint a Görcsönyi-hátság területéről ismert muszkovit-biotit gneisz alkotja. A kétféle kifejlődés kapcsolatára vonatkozó adat a területről nem került elő.

A medencekitöltő üledékek megfelelően ismertek a területen, részben az erőmű területén mélyített Paks-2. sz., részben a környék további, részletesen vizsgált fúrásainak adatai

alapján. Eszerint az alaphegységen jelentős vastagságú, részben törmelékes üledékekből, részben vulkanitokból álló, mintegy 1000 m vastagságú miocén képződménysor települ, amelynek egy része szárazföldi, egy része tengeri eredetű. A fő kőzettípusok a riolit, riolittufa, andezit, agyagmárga, mészmárga, homokkő, mészkő. A képződmények változó mértékben tektonizáltak, egyes esetekben 30°-os dőlésadatok is megfigyelhetők, helyenként a miocén képződménysor hiányos, s szerkezeti vonal mentén érintkezik a fedőjével. A miocén képződmények kifejlődési- és fáciesviszonyairól a rendelkezésre álló adatokból 1:200.000-es méretarányú térkép szerkeszthető.

A pannóniai képződmények ismertsége eléri az 1:100.000-es pontosságot. E képződménycsoport alsó része (kb. 12 millió éves), az alsó-pannóniai képződmények a területen viszonylag egységes kifejlődésűek. Főként kőzetlisztes agyagmárgából, agyagmárgás kőzetlisztből felépített réteg-együttesük részben víz alatti elmosás okozta réteghiánnyal, részben tektonikusan következik az idősebb (első esetben szarmata vagy bádeni, második esetben bádeni) képződményekre. A 100-150 m vastagságú üledék-együttesben helyenként kevés vulkáni eredetű betelepülés is megfigyelhető, s a Paks környéki fúrásokban észlelt szerkezeti jelenségeken kívül más fúrásokban is megtalálhatók a tektonikus megviseltség nyomai. A pannóniai képződmények felső részének üledékei mindenütt folyamatosan fejlődnek ki a fekvő képződményekből, legtöbb esetben a homokrétegek mennyiségének ugrásszerű növekedése jelzi a megváltozott fáciesviszonyokat. A felső-pannóniai rétegsor az egész területen átlagos kifejlődésű, különböző vastagságú homok-, agyagmárga-, márgás kőzetliszt-rétegek váltakozásában áll, s felső része minden esetben csonka; eróziós diszkordanciával települnek rajta a negyedidőszaki képződmények. A felső-pannóniai képződmények vastagsága a területen 500 m körüli. Településüket nyugodt, közel vízszintes dőlésadatok jellemzik, azonban egyes fúrásokban jelentős szerkezeti hatások nyomai figyelhetők meg a képződményeken. A felső-pannon képződmények kora 5-6 millió év.

A fentiekben jellemzett medencekitöltő üledék a jelenlegi ismeretek szerint az alábbiak szerint képződött.

Az aljzatra először a perm időszakban kerültek üledékek: a folyóvíz által szállított anyag oxidatív környezetet jelző homokköves kifejlődésben található meg. E permi homokköves összletre folyamatos átmenettel települ a jellegzetesen transzgresszív alsó- középső- triász rétegsor. Kezdetben még ebben is a folyóvízi jelleg és a vörös szín az uralkodó, csak magasabb szintjeiben jelennek meg előbb a zöld, majd a szürke, reduktívabb jellegű üledékek. A delta-sekélytengeri, majd lagúnás kifejlődéseket hipersalin képződmények követik, később pedig a tengeri viszonyok állandósulnak. Az újabb jelentős mértékű üledékképződéssel járó ciklus kezdődő szakasza, a felső-triász üledéksor a területen nem ismert, azonban részben a területről már leeső tengelici, részben a tolnanémedi jura kifejlődések fekvőjében feltételezhető jelenléte, s nincs kizárva, hogy az alföldi területrészen is meg lehetne találni a jura képződmények fekvőjében. A jura időszakra utaló kevés adat az üledékek kifejlődésében a mecsekihez hasonló képződési körülmények szerepét látszik megerősíteni; nem kizárt, hogy a medencealjzatban a mecseki kőszéntelepes összletnek megfelelő képződmények is megtalálhatók. Helyenként kevés, a kréta időszaki vulkáni tevékenységre és egyidejű üledékképződésre utaló adat is ismert a területen.

A kréta időszak és a miocén közötti hosszú szakaszra vonatkozóan üledékképződésre utaló nyomok nincsenek a területen. Ekkor a jelentős szerkezeti átrendeződéshez nagy mértékű lepusztulás is társult. A miocén elejére kialakult üledékgyűjtő vályúkba először durva

törmelékes, teresztrikus üledéksor rakódott, amelyre intenzív vulkáni tevékenységet jelző képződménysor települ: több szintben jelennek meg viszonylag közeli kitörési centrumokra utaló, változó összetételű vulkánit- és vulkanosediment képződmények. A vulkáni képződmények lerakódását helyenként csökkent sósvízi, édesvízi fáciesű üledékek betelepülése szakítja meg. Később, a miocén folyamán a folyamatosan tért hódító tenger nyílt vízi és parti fáciesei is megjelennek a területen. Előbbit a foraminiferás agyagmárga, utóbbit a lajtamészke és a szenes agyag betelepülések jelzik. A későbbi időszakban a medence mélysége tovább csökkent, s egyidejűleg megszűnt a kapcsolata a távolabbi üledékgyűjtőkkel. Előbb hiperszalín, helyenként bepárlódó lagúnás üledékképződési viszonyok, majd fokozatos kiédesedés a jellemző. Bár a vízzel borítottság állandó volt, az üledékképződési körülmények az egész Kárpát-medencére kiterjedő jelentős változásokon mentek át. A korábbi vízcserre, amely a Kárpátokon kívüli területekkel addig kölcsönös volt, előbb egyoldalúvá vált, majd meg is szűnt. A megemelkedett vízszintű és csökkenő sótartalmú beltengerben előbb agyagmárgás képződmények rakódtak le, majd a beáramló durvább törmelékanyagot a beltő áramlásai szétteregték. A későbbiekben, a Drávai Formáció képződésének idején előbb a hullámbázis alatti, nagyobb parttávolságot jelző képződmények, később sekélyebb vízi, a hullámozás által már időnként felkavart és újraülepített üledéksorok rakódtak le. A felső-pannóniai képződmények keletkezése idején tovább csökkent az üledékgyűjtő mélysége, de mocsári körülmények nem alakultak ki. A felső-pannóniai legvégének üledékei a területről hiányoznak, a pleisztocén rétegsor mindenütt hiányos pannóniai üledékekre települ.

A negyedidőszak folyamán a legjellemzőbb üledékképződési mozzanat a löszképződés volt, melynek termékei több szintben és kifejlődésben ismertek a területen. A klimatikus és szélenergetikai körülmények változásának függvényében nagy mennyiségű homok illetve kőzetliszt került a területre, amely a későbbi lepusztulás során sok esetben másodlagos helyzetben található meg. A löszbe helyenként betelepülő vékony bázisos tufacsíkok egyidejű vulkáni tevékenység nyomai. A pleisztocén végén a területen megjelent a Duna, s mint építő és romboló erő, meghatározójává vált a terület nagy része üledékképződési viszonyainak.

Az erőmű környezetének egészét negyedidőszaki, pleisztocén és holocén üledékek borítják. A rendelkezésre álló adatok alapján ezek elterjedéséről 1:50.000-es méretarányú térkép szerkeszthető. E képződmények részben folyóvízi, részben eolikus, részben lejtőüledékek, vagy ezek kombinációi. Maga az erőmű a Duna ártéri síkján települt, alatta és környezetében a pannóniai képződményeken mintegy 30 m vastagságú folyóvízi üledéksor települ, túlnyomórészt aprókavicsos homok és homok kifejlődésben; helyenként foszlányokban idősebb pleisztocén lösz-jellegű üledékek roncsai is megtalálhatók. A C14 kormeghatározás szerint ez a felső 30 m vastag réteg kora nem több 45000 évnél. A pleisztocén képződmények nyugodt településűek, szerkezeti hatásokra utaló nyomokat csak az erőműtől jelentős távolságra lehet a negyedkori képződményeken megfigyelni.

### **1.3. Geomorfológia, felszínképződés**

#### ***a) Folyóvízi eróziós és akkumulációs folyamatok és formák***

A gátakon kívüli széles ártéren a főfolyó időszakos aktivitását megszüntették, s ott a felszínfejlődés irányára elsősorban az antropogén tevékenység, a talajképződés és kis részben az organogén szukcesszió folyamata hat. Másrészt viszont a folyószabályozások óta a gátakon belüli leszűkített ártéren állandósultak a gyakran tartós magas vízállások, amelyek a folyó aktivitását jelentősen megnövelik. Ez fokozta a gátak átázását, az ármentesített területre a talajvíz áramlását, a vízfeltöréseket, a belvizek képződését, befolyásolva az ártéri

növénytársulások és a talajok fejlődésmenetét. A Duna Paks környékén ma kanyarogva bevágó szakaszjelleggel folyik. Pakstól É-ra a meder fenekén fekvő kavicsstakaró akadályozza a folyó bevágódását és szabad kanyarulat fejlesztését, Pakstól D-re már nincs ilyen akadály, a kavicsréteg 10-15 m-rel a mai meder alá süllyedt, így szabadon fejlődhetnek a Duna kanyarulatai.

A Duna Pakstól D-re természetes állapotban (azaz a gátak és mederrögző szabályozó művek nélkül) a levágott faddi és bogyszlói kanyarulatokhoz hasonló árvízi kanyarulatokat fejlesztett. Egy-egy ilyen nagy meander kialakulásától a természetes levételődésig kb. 150-180 év volt szükséges. A levágódott meander azután a hordalék és a természetes szukcesszió szerint töltődik fel és változik előbb pangó vizű morotvává, majd vízi növényzettel borított mocsárrá, végül égeres-füzes láperdővé. A begátolás után a hullámtéri morotvák szervesetlen, a gátakon kívül került ártér kanyarulatai pedig szerves anyagokból – bár jóval lassabban – már mind feltöltődtek.

Az egykori lefűzött meanderek üledékei, összefogódzó rétegsorai kijelölik és meghatározzák a felszín alatti vizek áramlási irányait. Így az egykori medrek lefutásirányainak, térbeli hálózatának ismerete alapvető fontosságú a talajvizek áramlásirányainak megismeréséhez.

A talajvíz az egykori medrek hálózatán keresztül összefüggő rendszert képez, s mindenkorai szintjét a Duna adott vízállása határozza meg. A talajvíz szintje elsősorban a feltöltődés előrehaladottabb stádiumában lévő, időszakos vízborítású meanderek feltöltődésére van hatással, mivel jelentősen befolyásolja a lápok szervesanyag-termelését, felhalmozódását.

### ***b) A szél eróziós és felhalmozó munkája, az általa kialakított felszínformák***

A vizsgált térségben, a jelenkorban a korábbi folyóvízi homokos üledékekből felépült térszíneken klimatikus és antropogén hatásra több fázisban fokozott deflációs tevékenységre, futóhomok-mozgásra került sor, aminek eredményeként sajátos, félig kötött futóhomok területekre jellemző forma-együttesek alakultak ki. Ezek nem csupán jelentős tájképformáló tényezők, hanem mind anyaguk (homok), mind domborzati sajátásaik a területhasznosításnak olyan környezeti adottsága, amely bármiféle terület-igénybevétel, telepítés, beruházás során, illetve után feltétlen figyelembe veendő.

### ***c) Süllyedés, szuffózió és roskadás***

A telephely környezetében elsősorban újholocén és holocén egykori ártéri képződmények, valamint jórészt futóhomokkal fedett hordalékkúp- és teraszfelszínnek jellemzőek, ahol a címben jelzett kisformák nem fordulnak elő.

A Paksi téglagyár és Tengelic-szőlőhegy ívében húzódnak a típusos lösszel, homokos lösszel fedett és a Dél-Mezőföldre tartozó löszplató és széles völgyközi háta területei. Ezek gyakori kisformái a szuffózió (oldási erózió) alakította mélyedések-löszdolinák, amelyek a lösz karsztos lepusztulás formái közé tartoznak. Ilyenek leginkább a Paks-dunakömlődi platón elszórtan találhatóak. Ovális vagy kerekded kis (10-200 m) kiterjedésükkel és sekély (1-5 m) mélységükkel a nagyformák színező elemei. Kialakulásukban a szuffózió mellett a lösz makroporozitásának is lényeges szerepe van.

A recens süllyedékek a felszínen nem mutatkoznak, viszont a korábbi fosszilis süllyedékek nagymértékben alakították a tágabb környezet geomorfológiai sajátosságait.

***d) A dombsági és a dombság peremi területek talajeróziós és tömegmozgásos (csuszamlásos) folyamatainak felmérése***

Recens tömegmozgások a Dunamenti síkot kísérő löszplató dunai oldalán hosszan elhúzódnak merőleges, löszakadási frontokra jellemzőek. A pusztulásukban a természeti tényezőknek és az antropogén hatásoknak egyaránt szerepük van.

Stabilizálódott, csuszamlásos lejtők a vastag lösszel fedett Mezőföld peremi lejtős területeken fordulnak elő, ahol pleisztocén csuszamlások formái és formamaradványai jellemzőek. Az itt mutatkozó hepe-hupás felszínek domború lejtőjű „hát”, „halom” és „púp” szerű formái régi pleisztocén csuszamlások emlékei. A kisebb, egyedi csuszamlásokkal szemben e típusban a nagy csuszamlások vannak túlsúlyban. A pleisztocén csuszamlásos mozgásoknak elsősorban a peremterületek lépcsőinek elrombolásában volt számottevő szerepük. Stabilizálódott csuszamlásos lejtők vertikálisan nagy elmozdulása tanulmányozható a Paksi Téglagyár vasútállomással szembeni rövid, meredek oldalán, ahol a több m-es elmozdulás mértéke fosszilis talajsíntek alapján meghatározható.

Csuszamlás-veszélyes lejtők azok a régi csuszamlás háborgatta felszínek, amelyek hidrogeológiai adottságaiknál fogva, valamint antropogén hatásra magukban hordozzák a csuszamlás aktivizálódásának feltételeit. A peremi területeken a magasparti szakaszokat leszámítva ilyeneket nem térképeztek.

Aktív csuszamlásos lejtők jellemzően karéjos szakadási vonalak mentén, vagy régi pleisztocén csuszamlás halmazokról válnak ki a meredek lejtőoldalakból. Ezek az 5 km-es körzeten belül nem jellemzőek, gyakorlatilag nincsenek.

***e) Az utolsó 100 000 év geomorfológiai folyamatai***

A telephely és közvetlen környezete a középső pleisztocén végéig (80-100 ezer évvel ezelőtt) szervesen kapcsolódott a Paks-Dunaszentgyörgy-Tengelic környéki löszterülethez. Ekkor alakultak ki a Mezőföldről az Alföld felé ENy-ről DK-re lefutó völgyek. Ezeknek a felső-pannóniai üledékek szárazulattá vált felszínébe vágódott és az erózióbázishoz – az ún. levantei tóhoz – lefutó eróziós völgyeknek, torrenseknek a harántmetszete rekonstruálható a dunaföldvári Öreg-hegy, a dunakömlődi Sánc-hegy előterében mélyített vagy az Atomerőmű és a KKÁT telephely alatti fúrások alapján. Részben áthalmozott, részben a CaCO<sub>3</sub> horizonttal jellemezhető vörösayag talajsorozatokkal vannak kitöltve.

A fúrásadatok alapján szerkesztett eróziós völgyek szélessége 50-70 m, mélységük pedig 3-10 m. Ilyen néhány fokos lejtőjű mélyedések, völgyek számos helyen előfordulnak, s néhány esetben, mint pl. Dunaföldvár, Dunaújváros vagy Dunakömlőd térségében fúrásokkal igazolható volt, hogy a Duna-Tisza közti hátság területén folytatódtak, s a kelet felé gyengén lejtő pannóniai-pliocén felszínen is követhetők.

**1.4. Alapvető tektonikai és szeizmológiai jellemzés**

A régió tektonikája komplex, amelyet az Afrikai tábla Dinári hegységgel való szubdukciója és az alpi régióban az Eurázsiai táblával való ütközése jellemez. Ezen folyamatok következtében keletkezett a Pannon medence, amely egy elvékonyodó extenziós terület a Kárpátok mentén a medence alá süllyedő Eurázsiai táblával. Közel 60 millió évvel ezelőtt a medence keleti irányban kiterjedt és kb. 12 millió évvel ezelőtt elérte jelenlegi méreteit. Mára a szubdukciós zóna Vrancea térségében maradt aktív.



A Pannon medencében a feszültség irányok viszonylag konzisztensek és illeszkednek lemeztektonikai irányokhoz. A magyarországi ismert fészekmechanizmusok legtöbbje strike-slip jellegű. A Pannon medencében az alapkőzetet neogén üledék fedi (23 millió évnél fiatalabb), ami elérheti a 6 km vastagságot. A neogén réteget jelentősen töredezett és gyúrt alsó és közép miocén (23-12 millió év) üledék és vulkanikus eredetű feltöltés és az ezt takaró, a 12 millió évesnél fiatalabb Pannon üledék képezi. A Pannon üledékben NyDNy-KÉK irányú strike-slip vetők vannak az alsóbb rétegekhez hasonló módon. A Pannon medence (egy lehetséges) neogén tektonikai térképét az 1. ábrán láthatjuk.

A Pannon medencében jelenleg is van feszültség-felhalmozódás, mely bizonyos, többé vagy kevésbé ismert szerkezeti vonalak mentén időnként kioldódik. A keletkező földrengések nagysága attól függ, hogy a feszültségek hatására az egyes szerkezeti elemek milyen könnyen tudnak egymáshoz képest elmozdulni. A lineamensekből és a sok elszórt kis földrengésből arra következtethetünk, hogy a medencealjzat nagymértékű töredezettsége miatt nagy feszültség nem halmozódhat fel. Ezzel magyarázható az 5,5 magnitúdónál nagyobb rengések ritkasága és az eddig tapasztalt 6,0 magnitúdó körüli felső korlát is. Az elvégzett geofizikai vizsgálatok azt mutatják, hogy a potenciáltér-anomáliák által jelzett tektonikai viszonyok a földrengés epicentrumokkal szoros összefüggést mutatnak. A földrengések elsősorban az anomáliák által jelzett törések jellegzetes pontjaihoz (elvégződés, irányváltozás, törések találkozási) kapcsolódnak.

Nem sokáig volt tartható az a nézet, hogy a telephely „földtanilag egységes, nagyméretű blokkban helyezkedik el, olyan zónában, melyben  $M \leq 5,0$  maximális magnitúdójú földrengésszék keletkezése lehetséges”. A fent említett, a Pannon üledékekre jellemző szerkezetek megjelennek a telephely alatt is. Alapvető kérdés, hogy a telephely közelében lévő, a régebbi szerkezeti vonalakat követő pannon vetők aktívak voltak-e a negyedidőszak során. A több mint tíz éves kutatás központjában a törésvonal természetének megismerése volt. Alapvető feltételezés volt, hogy az 1911. évi kecskeméti rengéshez ( $7-7,5^\circ$  MSK) hasonló méretűre a Kapos-vonal és annak ÉK-i folytatása mentén bárhol számítani lehet, másrészt egy fiatalabb, a Móri-árok folytatásának tekinthető tektonikus szerkezetet is valószínűsítettek, amely mentén viszont az 1810-es móri rengéshez ( $8^\circ$  MSK) hasonló intenzitású földrengést véltek lehetségesnek. Úgy vélték, hogy a nagyobb rengések előfordulási valószínűsége Pakson kétszerese az országos átlagnak. Egyes feltételezések szerint (Némedi Varga, 1977) a Kapos-vonal keleti folytatását a paksi kanyar jelöli ki.

A legújabb kutatások fényében ezt a feltételezést úgy módosíthatjuk, hogy a Kapos-vonal a Paks környékén feltérképezett vetőzónával egy en-echelon rendszerbe tartozik. Ennek pontos lefutása Pakstól nyugatra azonban nem jól térképezett, de nagy pontossággal ismert azonban a vetőzóna keleti irányú folytatása. A negyedkori aktivitás ellen szól az, hogy Paks tágabb térségében nincsen bizonyíték olyan méretű földmozgásra, amelyen kétségtelenül kimutatható tektonikus szerkezeteket hozott volna létre a felszín közeli részletesen vizsgált rétegekben. Mivel a területen a kvarter jelentős időhézaggal települ a pannon rétegsorra és területi kifejlődése is nagyon változatos, a klasszikus megközelítés, azaz a pannon rétegeket egyértelműen harántoló vetők felhatolásának meghatározása nem hozhat végleges és direkt eredményt. A 2. ábrán a telephely alatt húzódó szerkezet látható egy, a Dunán felvett sekély-szeizmikus szelvényen.

1. ábra: A Pannon medence (egy lehetséges) neogén tektonikai térképe

ARUP

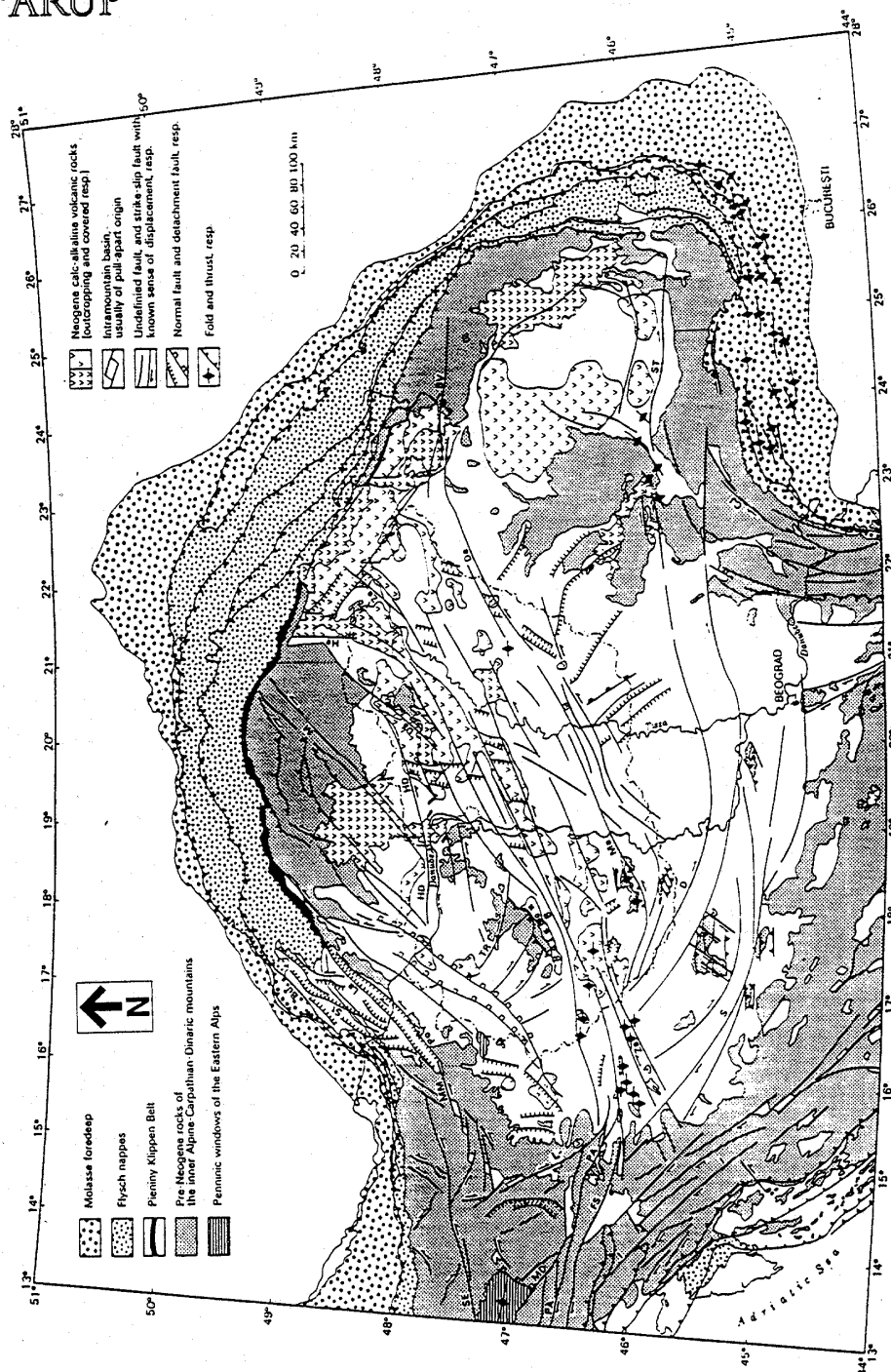
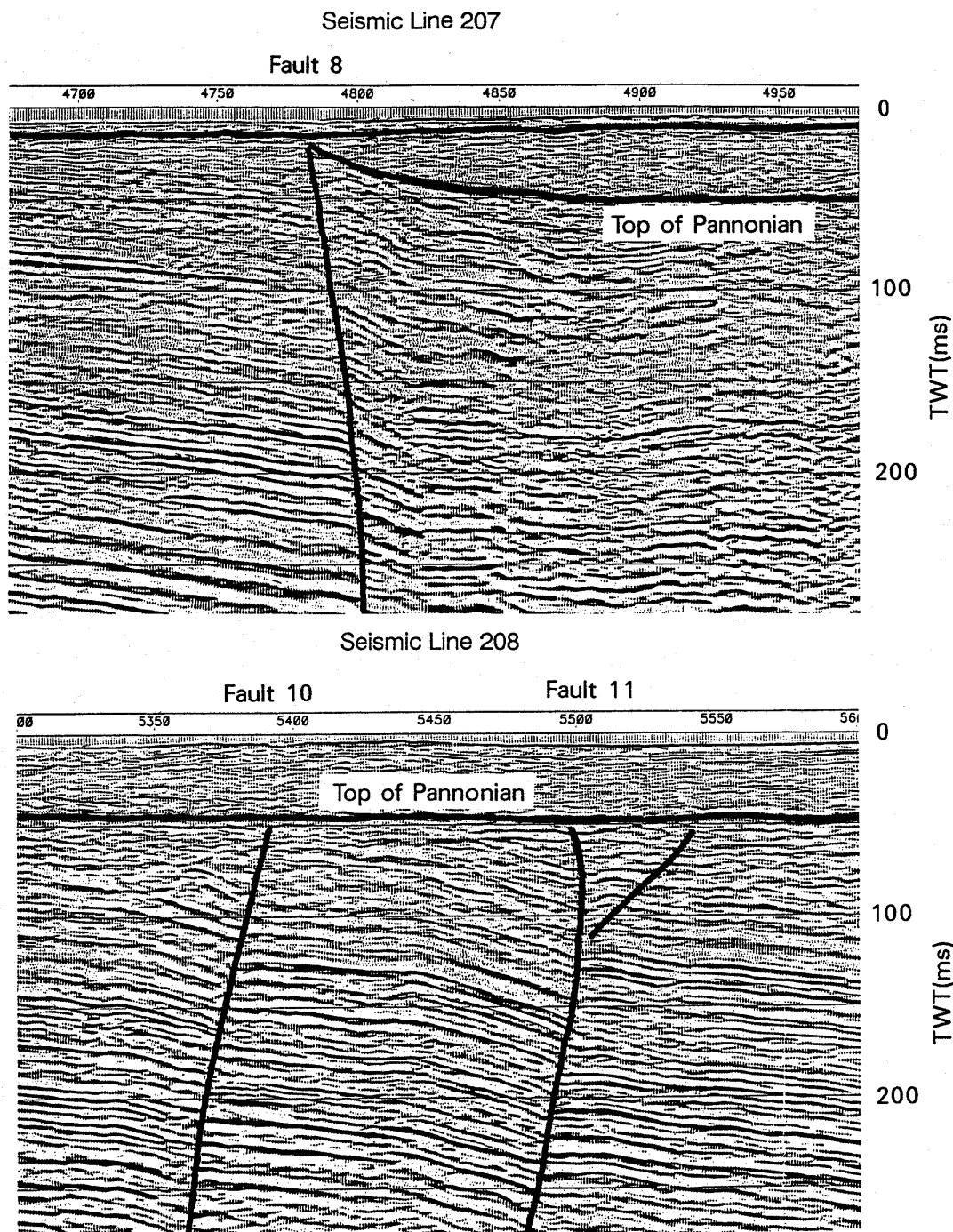


Fig. 4. Miocene tectonic map of the Pannonian basin and the surrounding Alpine-Carpathian-Dinaric mountains. Abbreviations assigning some of the main faults are as follows: *B* = Balaton line; *Bu* = Bulhary line; *BV* = Bogdan Voda line; *CJ* = Cerna-Jiu line; *D* = Dráva line; *Du* = Darnó line; *De* = Derecske line; *FS* = Fella-Sava line; *HD* = Hurbanovo-Diósjenő line; *Ile* = Ilernát line; *I* = Idríja line; *K* = Kapos line; *L* = Lavanital line; *La* = Lab line; *M* = Murán line; *Ma* = Mecsekajlja line; *MD* = Mölltrá-Drautal line; *MM* = Mur-Mürz line; *PA* = Periadriatic (Insubric) line; *Po* = Pottendorf line; *S* = Sava line; *SE* = Salzachtal-Ennstal line; *St* = Steinberg line; *ST* = Telegdi-Roth line; *Za* = Zagreb line; *Ze* = Zemplén line.

Ref : Horváth (1993)

2. ábra: A telephely alatt húzódó szerkezet egy a Dunán felvett sekély-szeizmikus szelvényen

ARUP



(See drawing D for location of section)

Ref : Tóth et al (1995)

Magyarország egészének szeizmicitása alacsonynak mondható, megjegyezve, hogy ennek ellenére erős rengések (MSK 8° körüli epicentrális intenzitásértékkel) kis számban, de előfordulnak, meglehetősen rendszertelen területi eloszlásban. A szeizmikus aktivitás területi eloszlása nem teljesen homogén, vannak az átlagnál egyértelműen aktívabbnak nevezhető területek (Komárom, Móri-árok, Kapos-vonal, Eger, Jászság, Zala megye északi része). Földrengések szempontjából nyugodt területnek nevezhető viszont Somogy déli része, a Mezőföld, és az alföld Tiszától keletre eső része, eltekintve Békés térségétől. A Pannon régió szeizmicitásáról alkotott korábbi képünk szinte kizárólag a történelmi rengések epicentrum eloszlásán alapszik. Mivel a régi rengésekről csak makroszeizmikus adatok állnak rendelkezésre, minden más jellemző csak ezekből becsülhető. A makroszeizmikus anyag minősége időben meglehetősen heterogén, minél távolabbi múltba megyünk vissza, annál hiányosabb. Mivel mindig a településekhez kötött adatokról van szó, melyben tükröződik az adott kor település-szerkezete, település sűrűsége, a makroszeizmikus epicentrum igen bizonytalan (+/-10-50 km), az észlelési küszöb pedig igen magas. Mindez oda vezet, hogy a Pannon medencében a szeizmicitás diffúz jelleget mutat (Gracsov, 1986), vagy másképpen megfogalmazva az ismert szeizmicitás nehezen hozható kapcsolatba az ismert tektonikával (ARUP, 1992). Általában elmondható, hogy az ismert tektonikai elemek és a rendelkezésre álló szeizmológiai adatok kapcsolata csak egyes esetekben mutatható ki, többnyire azonban ilyen kapcsolat nem ismerhető fel. E tektonikai elemek és a szeizmicitás kapcsolatát tekintve a mikroszeizmikus monitorozás hozott új adatokat.

A magyarországi földrengések fészekmélysége általában 9-12 km. A magyarországi rengések fészekmechanizmusát csak néhány esetben ismerjük. A berhidai rengés fészke – mely ilyen szempontból legjobban ismert – strike-slip jellegű volt.

A földrengések időbeli eloszlása (melyet a rengések kumulatív számával jellemezhetünk) a XIX. század közepétől a XX. század hatvanas évéig egyenletes volt, átlagosan évi három rengéssel, 1960-tól az érezhető rengések száma jelentősen csökkent, majd a legutóbbi években ismét az átlagos értéket mutatja. A XIX. század közepétől napjainkig terjedő időszak rengéseinek gyakorisága alapján, az ország területén gyakorlatilag évente kell számítani 4°-es intenzitású rengésre, míg 8°-as intenzitású rengésre 40-50 évente kerül egyszer sor.

A hazai megrázottsági viszonyokat bizonyos mértékben befolyásolja a környező országok szeizmicitása. Ezek főleg: Horvátország-Szlovénia, a Bécsi-medence (az ún. Thermen Linie mentén) a Kis Kárpátok övével, a Bánát és Kárpátalja. E zónák hazai hatása nem egyforma, különösen jelentős és a Dunántúl nagy részét érinti a Horvátország-Szlovéniai szeizmicitás magyarországi hatása. Az egyes külföldi zónák rengéseinek Magyarországon megfigyelt hatása a hullámterjedési viszonyok számottevő területi változásait tükrözi.

A Pannon-medence egyes peremterületeinek földrengés-gyakorisága lényegesen meghaladja a középső részét. A terület egészére vonatkozó gyakoriság tízszer akkora éves aktivitást jelez, mint amely csak a medence belsejére vonatkozik. A peremterületekhez viszonyított alacsony általános aktivitást a medencebelsőben lévő földkéreg közeteinek geológiai sajátosságai magyarázhatják. A Pannon-medencében a földi hőáram és emiatt a geotermikus gradiens is a környező területeknél lényegesen magasabb. A magas hőmérsékletből adódóan kisebb mélységig tart a kéreg törékeny viselkedésű tartománya, ami általában kevesebb és egyben sekélyebb fészkeű földrengéssel jár.

Összességében Magyarország földrengés veszélyeztetettsége moderált, lényegesen nagyobb, mint például a Brit-szigeteké, csekélyebb, mint a környező országoké és hasonlít az USA

keleti részének veszélyeztettségéhez. Mindebből következik, hogy a paksi telephely szeizmitásának újraértékelése igen fontos szaktudományos és biztonságra kiható kérdés.

A fenti ismeretek szintézisét az 1., 2., 3. és 4. térképfüggelékben láthatjuk a regionális és telephelyi szinteknek megfelelő felbontásban.

## 2. A telephely földrengés veszélyeztetettsége

A telephely szeizmitása volt az elmúlt évtized egyik legtöbbet kutatott és az atomerőmű telepítése, létesítése óta alapjaiban átértékelt, az erőmű biztonságát befolyásoló telephelyi jellemző. A mértékadó földrengés meghatározásán túl a közelmúlt kutatásainak legfontosabb eredménye volt felszínre kifutó elvetődés lehetőségének kizárása és a telephely alkalmasságának igazolása.

A NAÜ szakértői felülvizsgálatról készült előzetes jelentés alapján 1993. okt. 7 - 8-án nemzetközi részvétellel (meghívott angol, francia és olasz szakértők) és minden mértékadó hazai intézmény (MÁFI, ELGI, GGKI, ELTE) és szakember bevonásával megrendezett szakmai konferencián PA Rt. összeállította a telephelyvizsgálat lezárásához szükséges kutatási programot. Tekintettel azonban arra, hogy a hazai tudományos közvélemény a prioritások kérdésében némileg megosztott volt, a programot független, a végrehajtásban nem érdekelt és a témát ismerő szakkég, az OVE ARUP ellenőrizte és egységes programmá specifikálta.

1993. szeptemberétől 1995. januárjáig a munka három, egymással összefüggő részprojekt keretében folyt, amelyek megalapozták a telephely szeizmitásának nemzetközileg elfogadott értékelését:

- földtani (geofizikai, geológiai, szeizmológiai) vizsgálatok elvégzése, részint a meglévő adatok ellenőrzése, részint pedig adatok kiegészítése céljából,
- mikroszeizmikus monitorozó rendszer létesítése és az adatgyűjtés, feldolgozás megszervezése,
- geotechnikai vizsgálatok a talaj dinamikai tulajdonságainak, és a talajfolyósodás lehetőségének meghatározására.

A projekt megvalósulását

- az Európai Közösség PHARE Regional Programme for Nuclear Safety 4.2.1 VVER 440-213 Seismic Hazard Reevaluation c. projektje (végrehajtó az OVE ARUP angol cég),
- a belga-magyar együttműködésben a BELGATOM,
- műszaki segélynyújtási program keretében pedig a NAÜ támogatta.

A NAÜ a program végrehajtását nemzetközileg elismert szakértőkkel rendszeresen (1993. szeptember, 1995. január, június, november, valamint 1996. január) felülvizsgáltatta, értékeltette és ajánlásokat adott a végrehajtást illetően.

A programot a PA Rt menedzselte a hazai résztvevők pedig az ELTE, MÁFI, MTA GGKI, MTA Földrajztudományi Intézet, GEORISK Kft, illetve az egyes témakörök jeles hazai szakértői voltak.

A vizsgálatokat összegző OVE ARUP tanulmány elégségesnek minősített ismeretanyag és adatbázis felhasználásával készült és választ ad a telephely veszélyeztettségére vonatkozó

három alapvető kérdésre (felszínre kifutó elvetődés, a mértékadó földrengés telephely-specifikus jellemzői, a talajfolyósodás).

A hazai intézmények által szolgáltatott adatok és a magyar szakemberek értékelései alapján az OVE ARUP cég 1995. december 31.-re elkészítette az összefoglaló értékelést és a számítások alapjául szolgáló szeizmotektonikai modellt és elvégezte a mértékadó (1/10000 év gyakoriságú) földrengés válaszspektrumának, maximális vízszintes gyorsulásának kiszámítását. Az értékelés OVE ARUP által választott valószínűségi módszere lehetőséget adott arra, hogy az adatok esetleges elégtelenségét, bizonytalanságát és ellentétes interpretáció lehetőségét is figyelembe vegye, ami természetesen a végkövetkeztetés és eredmény konzervatívizmusához vezetett. Az eredmény konzervatív voltát erősíti az, hogy a PA Rt döntése alapján az értékelés nem az erőmű maradó élettartamának figyelembe vételével, hanem egy új erőmű teljes élettartamára adott követelményből levezetve történt. Megállapították, hogy a mértékadó földrengés okozta maximális szabadfelszíni vízszintes gyorsulás értéke 0,25 g, globális talajfolyósodásra az 10000 éves bázison nem kell számolni.

1995. januárjában az OVE ARUP zárójelentését a NAÜ felülvizsgálta, megállapította, hogy a munka eredményesen lezárult, a NAÜ vonatkozó előírásai szerint teljes és az eredmények elegendően konzervatívok ahhoz, hogy a Paksi Atomerőmű földrengésbiztonsága értékeléséhez és a földrengésbiztonsági megerősítésekhez inputként szolgáljon. A NAÜ javasolta ugyanakkor a mikroszeizmikus monitorozás folytatását.

1997-ben Marosi Sándor és Meskó Attila akadémikusok szerkesztésében az Akadémiai Kiadónál megjelent a paksi telephely földtudományi értékeléséről szóló monográfia. Ebben a munkában résztvevő 17 jeles tudós és szakember foglalja össze az értékelés tudományos alapját adó hazai tudományos eredményeket, a több száz kutatási jelentés, tanulmány lényegét.

A témakör áttekintésénél feltétlenül külön ki kell térni a mikroszeizmikus monitorozásra. A monitorozó rendszerre vonatkozó követelményeknél a NAÜ előírásait követtük a minimális érzékenység és a lokalizáció pontosságát illetően (Paks 100 km-es körzetében 2 magnitúdójúnál nagyobb rengéseket kell detektálni 1 kilométernyi fészek meghatározási pontossággal). A rendszer telepítés tervét hazai és külföldi (pl. British Geological Survey) szakértőkkel és a NAÜ-vel véleményeztettük. A tervezést, telepítést, üzemeltetést és adatfeldolgozást a PA Rt megbízásából a GEORISK Kft végezte, illetve végzi. Tudni kell, hogy az ország más, a PA Rt rendszeréhez hasonló teljesítő képességű rendszerrel nem rendelkezik. A rendszer jellemzői olyanok, hogy nem csak telephelykutató, hanem általános tudományos célokat szolgál. PA Rt évente publikáltatja az eredményeket a tudományos felhasználás érdekében.

1998-ban elkészült 16 neves szakember (GEORISK, ELGI és ELTE) közreműködésével az az összefoglaló kutatási jelentés, amelyet a mikroszeizmikus adatok feldolgozása és értékelése alapján újból megerősíti a telephely szeizmicitásának értékelését és a mértékadó földrengés jellemzőinek konzervatív voltát.

### **Földrengés-veszélyességi számítások**

Az összefoglaló alapját az OVE ARUP cég által az Európai Közösség PHARE Regional Programme for Nuclear Safety 4.2.1 VVER 440-213 Seismic Hazard Reevaluation c. projektje keretében a Paksi Atomerőmű telephelye szeizmikus veszélyeztetettsége tárgyában

végzett vizsgálatait, illetve az arról szóló négy fő részből álló kétkötetes angol nyelvű jelentés képezi. Az alábbiakban összefoglaljuk a vizsgálatokat és azok eredményeit.

A valószínűségi földrengés veszélyeztetettség számítás három alapvető kiinduló információt igényel:

- a szeizmotektonikai zónák, tulajdonképpen a földrengés forrászónák modelljeit,
- a zónákra jellemző paramétereket, úgymint földrengés méret és gyakoriság összefüggés, fészekmélység, maximális magnitúdó, a törés típusa, a felszakadás hossza, a törés menti elmozdulás sebessége, stb.
- a földrengés csillapítási, attenuációs függvényt.

Ezekből az adatokból statisztikai módszerekkel kiszámítható az adott visszatérési periódushoz rendelhető gyorsulás (elmozdulás) amplitúdó. Az adatok és a modellezés bizonytalanságát logikai fa formájában lehet megfogalmazni, illetve kezelni. Az input paraméterek alternatív értékeihez - az adatok értékelésére támaszkodva - becsült súlyokat lehet rendelni. A számított értékek súlyozott átlaga a legjobb becslés a kiválasztott jellemzőre (pl. válaszspektrum).

A PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment, valószínűségi földrengés veszélyeztetettség értékelés) elvégzéséhez négy alternatív területi forrásmodell készült a Pannon medence szeizmicitásának, geológiájának és tektonikájának jellemzésére. Külön modell szolgál a medencét körülölelő régió forrásterületei hatásának figyelembevételére. A telephely környezetében azonosított szerkezetek leképzése két vonalas forrás modellel történik.

Az **A** forrásmodell egyik zónája a jelenlegi Magyarország csaknem teljes területét felöleli, kivéve a Pannon medence DK-i sarkának megfelelő területet, amely az előzőtől eltérő töréses szerkezetű. A nagy homogén forrásterület a diffúz szeizmicitást és a környezethez képest vékonyabb, egyenletes vastagságú kérget reprezentálja. Ennek a modellnek a súlya 0,2.

A **B** forrásmodell, amelynek súlya 0,3 a regisztrált földrengések eloszlását és a geológiai sajátosságokat kombinálja. A modell négy DNy-ÉK irányú sávból áll:

1. Rába zóna, süllyedő terület, alacsony szeizmicitás,
2. középhegységi öv, moderált, egyenletes eloszlású szeizmicitással, emelkedő terület,
3. balos laterális extenziós törésekkel jellemezhető középső sáv, amely a telephelyet is magában foglalja, kapcsolódik a Tisza és Szolnok főegységhez, alacsony és eléggé egyenletes szeizmicitás jellemzi, a terület a kiemelkedő hegyvidéki és a D-i irányban süllyedő medencét reprezentálja,
4. a medence DK-i sarka, amelyet jelentős süllyedés és ÉNy-i irányú törésvonalak jellemeznek, a szeizmicitás moderált.

Az úgyszintén 0,3 súlyú **C** modell lényegében a **B** modell finomítása, ahol a középső sáv a negyedkori üledék eltérő vastagságának megfelelően két részre, az úgynevezett DK-i sarok pedig a normál vetők előfordulása szerint két részre bontott.

A **D** modell a földrengések területi eloszlását tükrözi, súlya 0,2.

A zónákban a rengések gyakoriságát ( $N$ ) a Gutenberg-Richter féle összefüggés írja le:  $\log N = a - bM$ , ahol  $M$  a földrengés magnitúdója. A Pannon medencében lévő forrásterületekre az  $a$  és  $b$  értékeit a rendelkezésre álló katalógus adatokból lehet meghatározni. Az aktivitás

bizonytalanságát megfelelő súlyokkal lehet figyelembe venni (medián 0,6 súllyal, 5% és 95% 0,2 súllyal).

Az ARUP a különböző forrásterületekre definiálta a földrengések visszatérési idejét a  $\log N = a - bM$  reláció specifikálásával. Ennek során  $b = 0.82$  értéket használt minden esetben, és megkötötte, hogy milyen mértékű lehet a területen várható legnagyobb rengés. A Pannon medence alpi-dinári-délkárpáti peremén ez  $M_{\max} = 7.3$ , míg belső részein  $M_{\max} = 6.1 - 6.7$  intervallumban változott, a 6,1 érték 0,2 súllyal, 6,4 érték 0,6 súllyal, a 6,7 pedig 0,2 súllyal. A rengések fészekmélységére azt a feltételezést tették, hogy az a 0-15 km (30% valószínűséggel), illetve a 0-20 km (70% valószínűséggel) mélységtartományba esik.

A telephely környezetében azonosított, nagy valószínűséggel nem aktív szerkezeteket két vonalas forrásmodell reprezentálja. A telephely és környezete tektonikai jellemzésével összhangban a vonalas források aktív voltának valószínűsége összesen 0,1. Az egyik vonalas modell a telephely környezetében a szeizmikus szelvényekben azonosított szerkezeteket, a másik pedig a töréses zóna alatt feltételezett a Pannon medence aljzatában lévő törésvonalat képezi le. A vonalas források jellemzésére, konkrét aktivitás adatok és más geomorfológiai evidencia hiányában, fészekmélységre, a törés típusára, a felszakadás hosszára, a törés menti elmozdulás sebességére vonatkozó feltevések, illetve az ebből származtatható maximális magnitúdó és aktivitás szolgáltak. A maximális magnitúdó értékek (6,0-6,5, illetve 6,1-6,6) és az azokhoz rendelt súlyok (együttesen a vonalas modellek aktivitásának 0,1 valószínűségével) összhangban vannak azzal a megállapítással, hogy a telephely környezetében lévő szerkezetek elvetődést igen nagy valószínűséggel nem okoznak felszínre kifutó elvetődést.

A földrengések csillapodása, attenuációja, ahogy azt a hazai kutatások is igazolják fokozott, mivel a vékony, töredezett alapkőzet átvitele gyenge. A számítások három egyenlő súlyú, a magyarországi tapasztalatoknak megfelelő csillapítási függvényel történtek.

A számítás logikai fája a 3. ábrán látható. A számítások az OVE ARUP Oasys SISMIC programjával történtek.

A számítás a maximális vízszintes, illetve függőleges gyorsulásértékre, valamint az 5%-os csillapítású, közetkibúváson vett egyenletes veszélyeztetettségnek megfelelő válaszspektrum (UHRS) meghatározására vonatkozott. Az UHRS amplitúdója minden periódusértéknél egyenlő meghaladási valószínűségű. Az 1000, 10000 és 100000 éves visszatérési időkre vonatkozó UHRS-t a 4. ábrán láthatjuk.

A 10000 éves visszatérési periódusú földrengés vízszintes és függőleges gyorsulás-komponenseinek UHRS-e az 5. ábrán látható.

Tanulságos a best estimate maximális vízszintes gyorsulásérték függése a visszatérési időtől: 1500 és 16900 év közötti intervallumban a GPA 0,12 és 0,30 g között változik, 5700 év esetén 0,20 g.

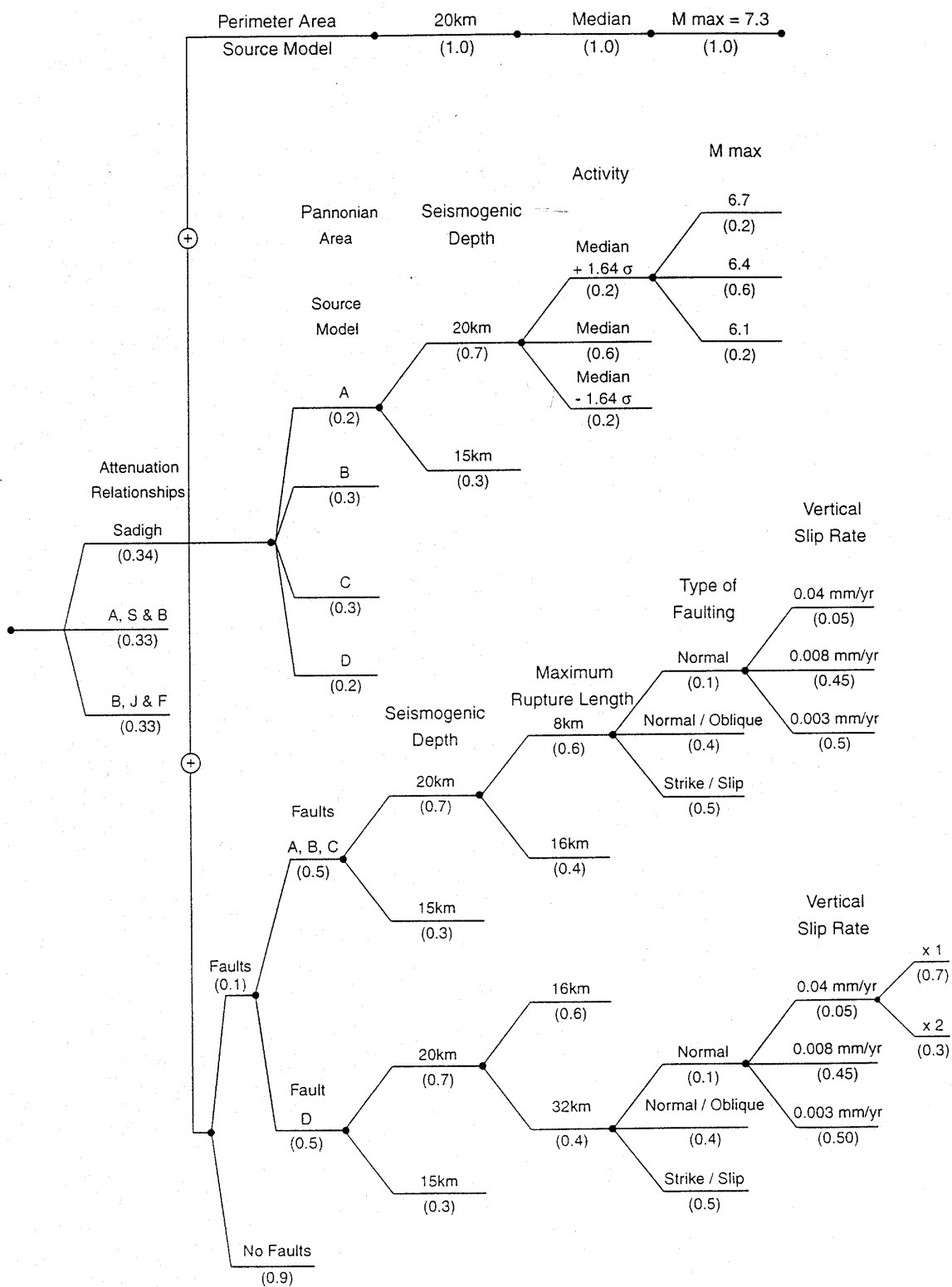
Az eredmény statisztikai bizonytalansága elég jelentős, 2,5-szeres eltérés van az 5 %, illetve a 95 % konfidencia szint között és 1,7-szeres a 15 % és 85 % között.

A 10000 éves visszatérési időre vonatkozó best estimate UHRS tervezési alapként való használhatóságát a DG-1032 szerinti kontrol földrengésre való ellenőrzés alapján lehet eldönteni. Eszerint meg kell határozni két, a telephely megrázottságát determináló földrengést, melyek közül az egyik az 5-10 Hz tartományban, másik pedig az 1-2,5 Hz adja a talajmozgás döntő hányadát.

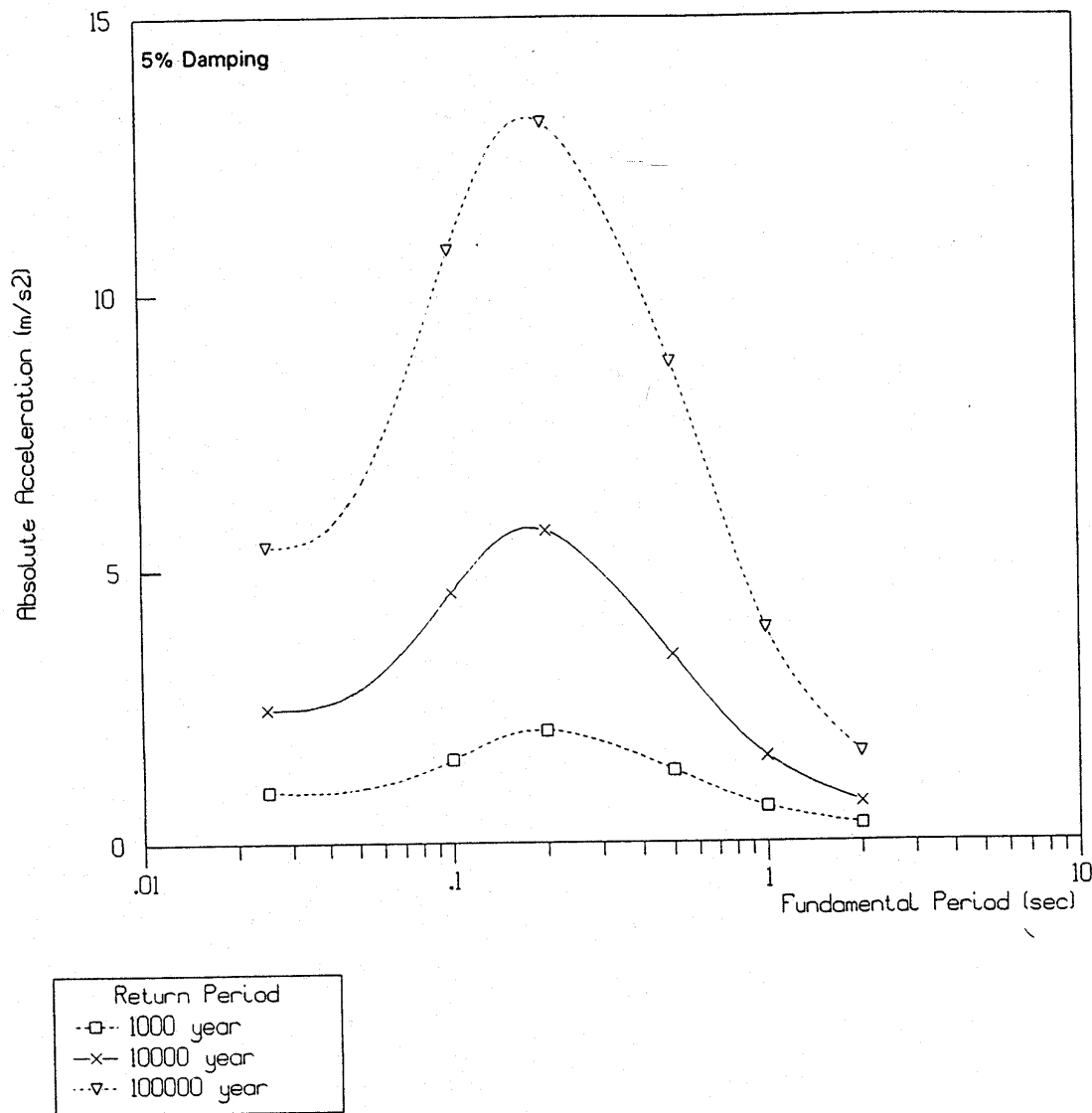


3. ábra: A PSHA logikai fája

ARUP

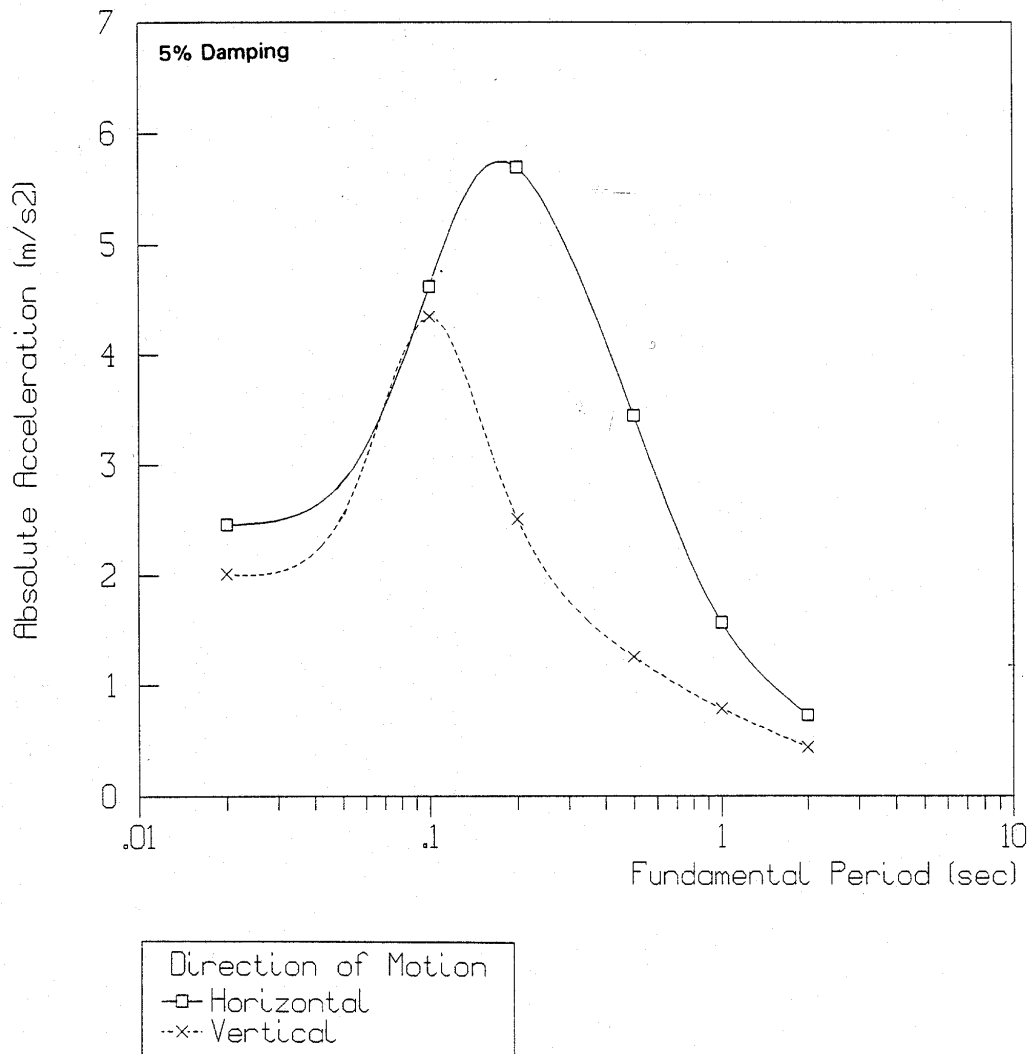


4. ábra: Az 1000, 10000, és 100000 éves visszatérési időkre vonatkozó UHRS  
ARUP



**5. ábra: A 10000 éves visszatérési periódusú földrengés vízszintes és függőleges gyorsuláskomponenseinek UHRS-e**

ARUP



Figyelembe kell venni azt a távoli rengést is, amelynek az eredményhez való hozzájárulása 5%-nál nagyobb. A DG-1032 előírásnak megfelelően a 11 km távolságban kipattanó 5,7 magnitúdójú, illetve 18 km távolságban kipattanó 6,0 magnitúdójú rengést, továbbá 200 km-re lévő 7,2 magnitúdójú rengést kell kontroláló rengésként vizsgálni, a telephelyre kiszámított válaszspektrumaikat az UHRS-sel összevetni. A 6. ábra azt mutatja, hogy a három ellenőrző rengés spektrális amplitúdója a jellemző periódusoknál jól egyezik a best estimate UHRS amplitúdóival, tehát az UHRS hihető és alkalmazható, mint tervezési alap.

A PSHA eredményét determinisztikus módszerrel meghatározott mértékadó földrengés válaszspektrummal való összehasonlítással is lehet ellenőrizni. Ezt a NAÜ szakértői is tanácsolták. A determinisztikus értékelés a paksi telephely esetében bizonyos körültekintést, megfontolást igényel. Nincs értelme az összehasonlításnak, ha feltételezzük, hogy maximális (legnagyobb) földrengés a telephely alatt közvetlenül pattan ki. Egy ilyen számítás nyilvánvalóan minden periódusnál extrém magas amplitúdókat ad. A paksihoz hasonló szeizmicitású esetekben (pl. USA keleti része) a régióban megfigyelt legnagyobb magnitúdójú rengés átlagos hatását kell venni, feltéve, hogy a rengés bárhol kipattanhat a telephely 25 km-es környezetében. Ezt az átlagos hatást kb. 15 km-re kipattanó rengés reprezentálja 84%-os konfidencia szintű attenuációval, amelynek eredménye 84%-os konfidencia szintű. A paksi telephelyre végzett számítás a régióban tapasztalt legnagyobb, 5.9 magnitúdójú rengésre (1832., Érmellék) és három, 84%-os konfidencia szinten vett attenuációs összefüggéssel történt. Az így kapott válaszspektrumok összehasonlítva a 10000 éves best estimate UHRS-sel igazolják ez utóbbi tervezési alapként való alkalmazhatóságát, lásd a 7. ábrát.

### **A maximális méretezési földrengés jellemzői**

A mértékadó földrengés válaszspektrumát ki kell számítani a szabadfelszínre, mivel a földrengésbiztonsági elemzések és tervezések ezt az inputot igénylik.

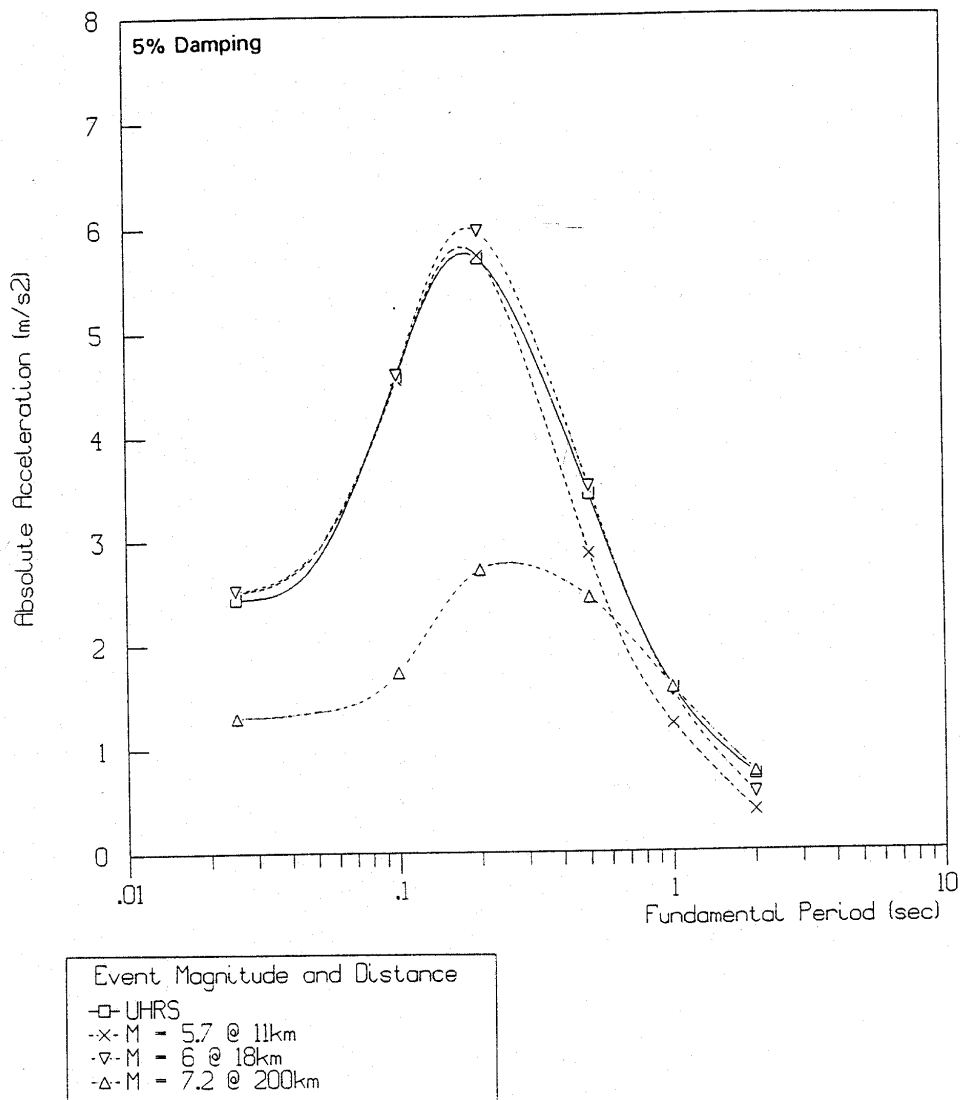
Az elemzés a részletes geotechnikai adatok felhasználásával (alakváltozás függő G és csillapítás, stb.) az Oasys SIREN egydimenziós nemlineáris, hiszterézises csillapítással számoló programmal történt, amely a vízszintes rétegekből álló talajoszlop válaszát adja meg. A számítás szerint a felső talajréteg 0,5 s periódus környezetében mintegy 1,5-szörös amplitúdó növekedést eredményez. A domináns frekvencia tartomány a szabadfelszínen 3 Hz környezetében van szemben a kőzetkibúváson kapott 5 Hz körüli erősítéssel. Ez a hatás várható a felső, negyedidőszaki, átlagosan 30 m vastagságú, laza, 300 m/s nyíróhullám-sebességgel jellemzett talajrétegtől. A számított mértékadó szabadfelszíni válaszspektrum a 8. ábrán látható.

A vertikális komponens esetében a felső talajrétegek módosító hatása az elemzések szerint elhanyagolható, így az 5. ábrán lévő függőleges válaszspektrum felfogható, mint a függőleges komponens szabadfelszíni válaszspektruma.

A mértékadó földrengés okozta maximális szabadfelszíni vízszintes gyorsulás értéke 0,25 g, míg a függőleges komponensé 0,2 g.

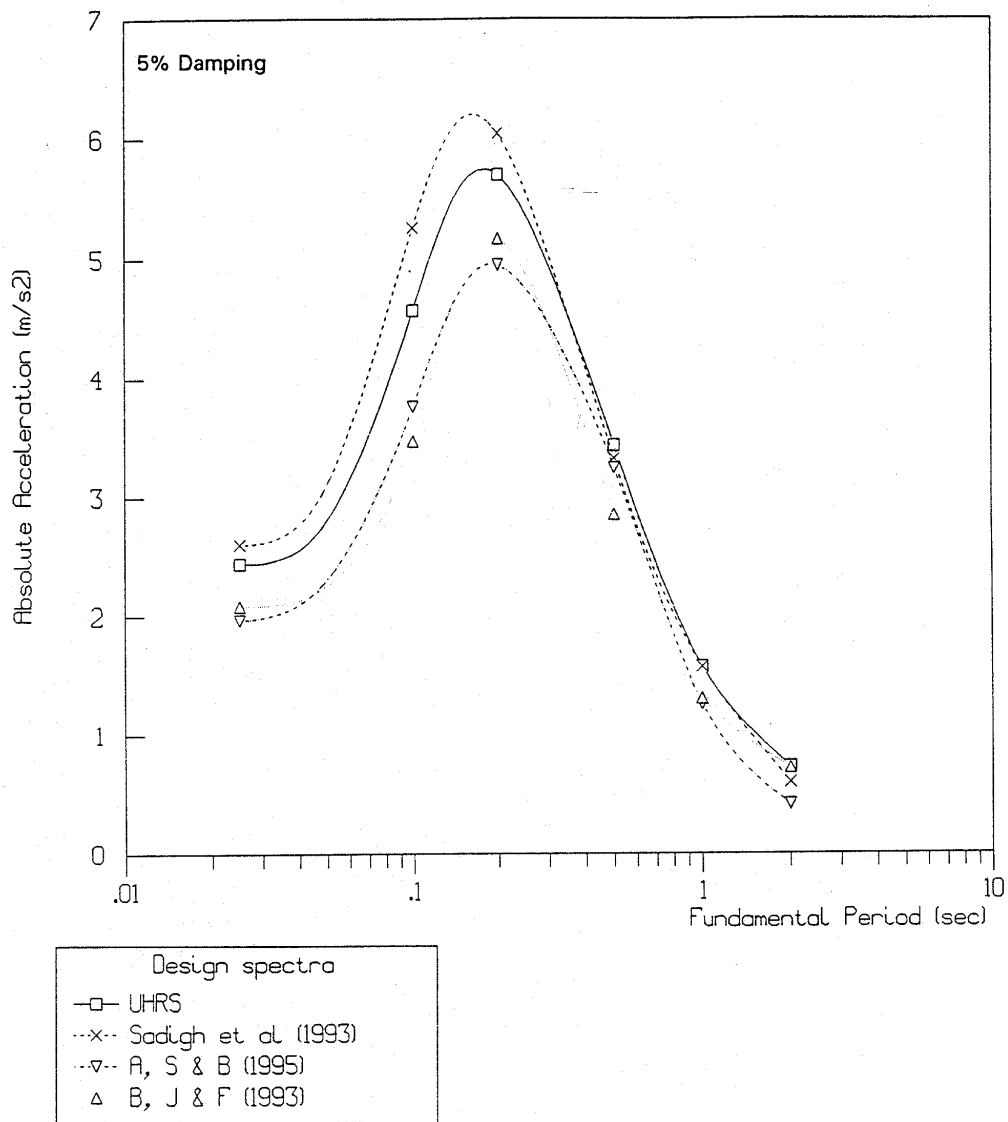
6. ábra: A három ellenőrző rengés válaszspektruma és a PSHA eredményeként kapott best estimate UHRS összehasonlítása

ARUP



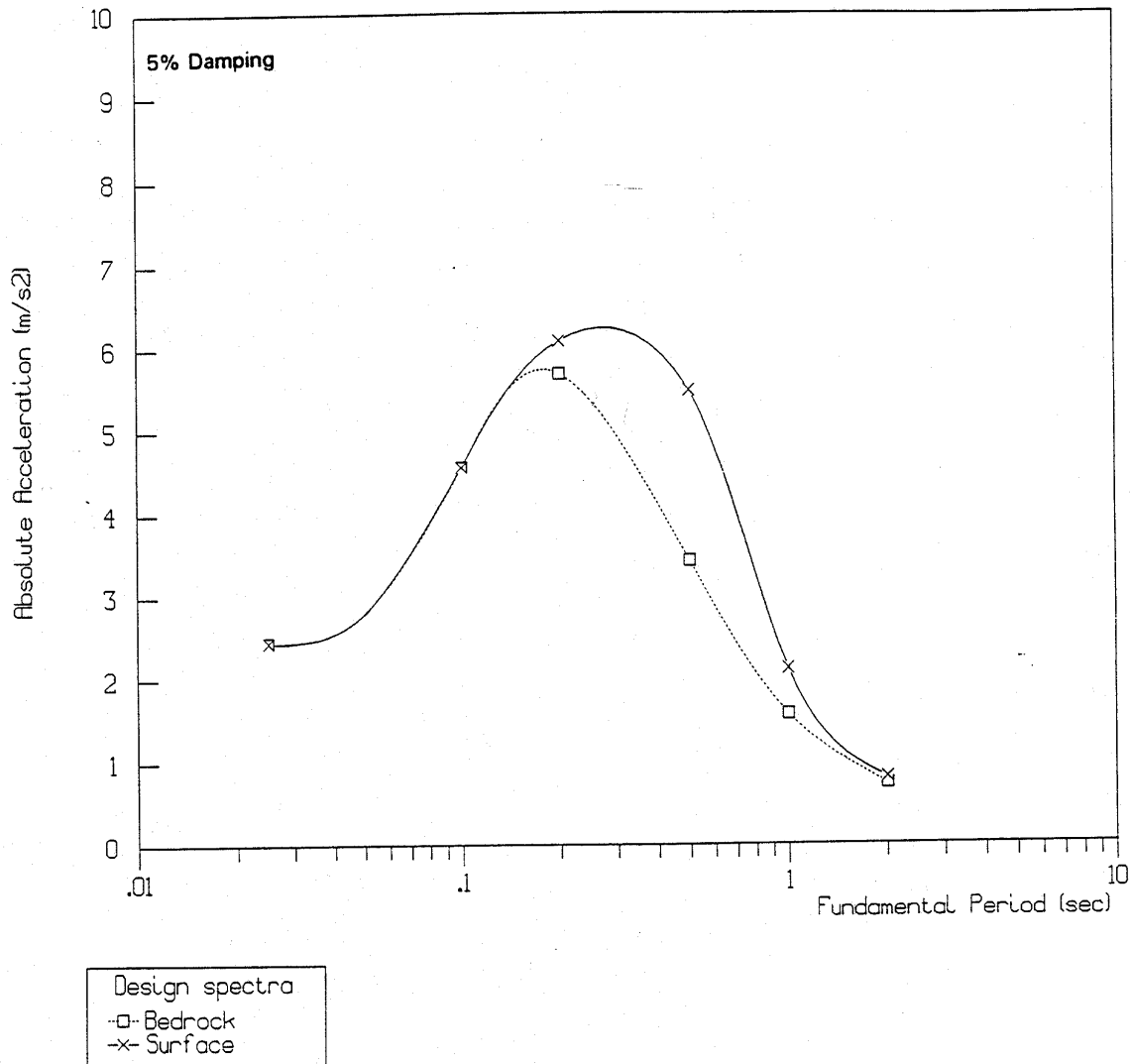
7. ábra: A determinisztikus válaszspektrum és a PSHA eredményeként kapott best estimate UHRS összehasonlítása

ARUP



8. ábra: A számított mértékadó szabadfelszíni válaszspektrum

ARUP



## A telephelyre jellemző kockázati görbe

A telephelyre jellemző kockázati görbe arra a kérdésre ad választ, hogy valamely időtartam alatt mekkora az a legnagyobb méretű földrengés, avagy talajgyorsulás (GPA), amelynél nagyobb nem fordul elő adott valószínűséggel. Különböző talajmozgás értékek esetén ez a válasz az úgynevezett kockázati görbével (hazard curve) reprezentálható célszerűen. A kockázati görbe azt az értéket adja meg, hogy valamilyen mértékű talajmozgás adott idő alatt milyen valószínűséggel ér el, illetve halad meg egy adott szintet.

A 62/1997. (XI. 26.) IKIM rendelet, illetve az NBSZ 3. kötet értelmében az S-2, azaz a maximális méretezési földrengés esetében a periódus 10000 év, a zavartalan üzemeltetés határeseménye, azaz az S-1 földrengés esetében ez a periódus célszerűen 100 évre választható. A szeizmikus PSA (Valószínűség alapú biztonsági analízis) adatigénye azonban nem csak e két szint jellemzőit, hanem a kis rengésektől egészen az adott helyen elképzelhető maximális magnitúdóig a teljes esemény halmaz méret, vagy gyorsulás-gyakoriság eloszlásának, az úgynevezett kockázati görbének (hazard curve) ismeretét követeli meg.

A primer szeizmológiai információ a magnitúdó-gyakoriság függvény. A mikroszeizmikus monitorozás adataiból ez a függvény meghatározható a kis magnitúdók tartományában. A telephelyet érő nagy rengések gyakoriságának eloszlását az ARUP jelentésből lehet venni. A mikroszeizmikus megfigyelési időszak alatt, az  $ML = 0.6 - 3.7$  magnitúdó tartományban 88 földrengés volt a vizsgált, 45.5–49.0 északi szélességi és 16.0–23.0 keleti hosszúsági koordinátákkal határolható területen, amelyek alapján Gutenberg-Richter összefüggés paraméterei meghatározhatók. Ez a teljes monitorozott területre az  $1,5 \leq M \leq 3,5$  magnitúdó tartományban

a teljes monitorozott területre:  $\log N = 2,66 - 0,75M$   
 az ARUP Class2 forrásterületre:  $\log N = 2,55 - 0,78M$ .

Az ARUP által a történelmi rengések  $4 \leq M \leq 5,5$  tartományára illesztett összefüggés meredeksége 0,82, ami jól egyezik a fenti értékekhez.

A földrengés-gyakoriság maximális vízszintes gyorsulás szerinti eloszlásának kiszámítása, a fentiekhez hasonlóan, a mért mikroszeizmikus sebesség-rekordok feldolgozásával, a magnitúdó,  $M$ , az epicentrális távolság,  $R$ , és a maximális vízszintes gyorsulás,  $A$ , közötti összefüggés meghatározásával történt. Ez az összefüggés

$$\log A = -2,747 + 0,683M - 1,690 \log[(R^2 + 2,2^2)^{0,5}] + 0,417S + 0,330P \quad 0,5 < M < 4,0$$

ahol

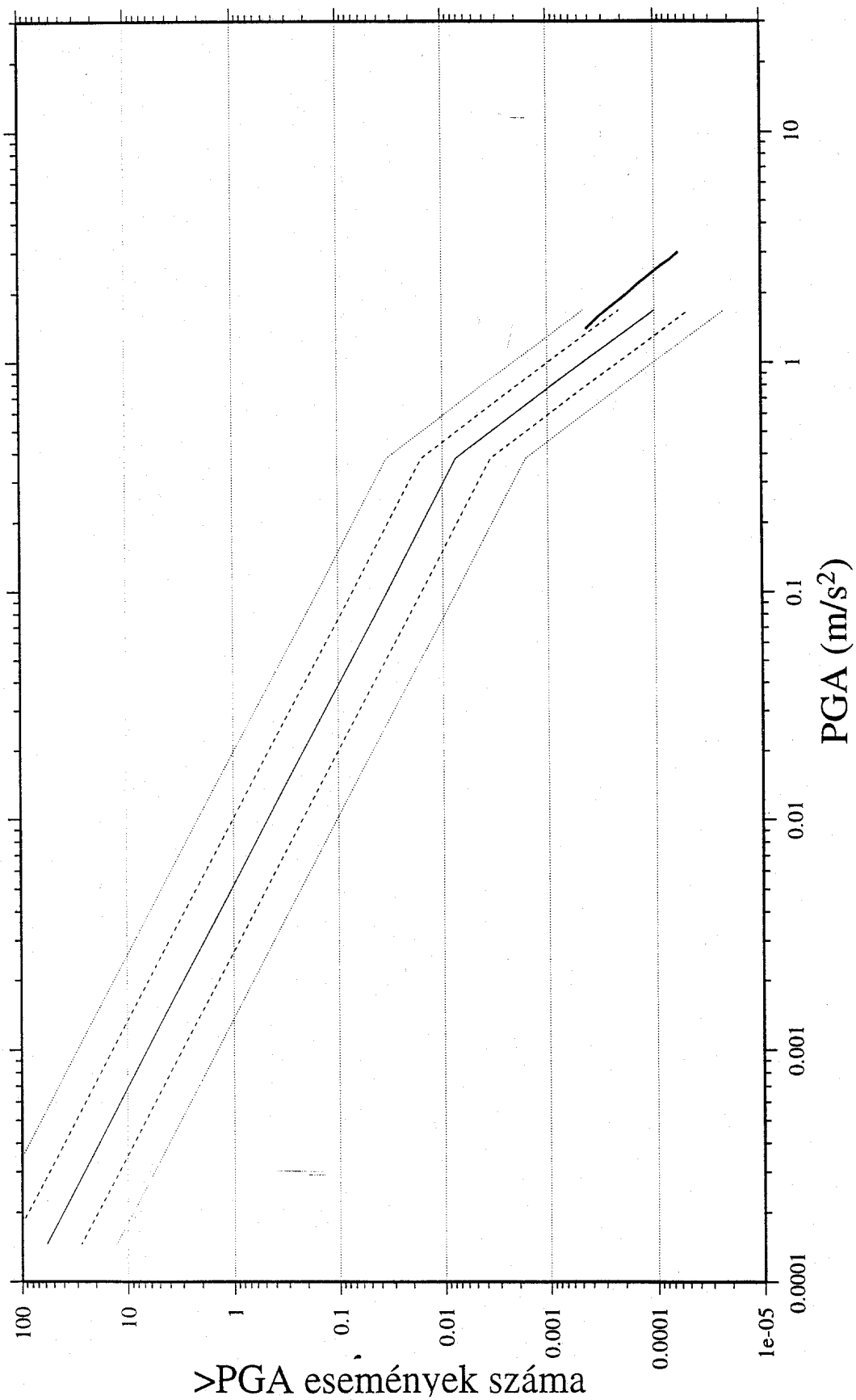
$S$  a szeizmológiai állomás környékének geológiai viszonyaitól függ, értéke 0, ha az konszolidált kőzet, 1, ha laza üledék,

$P$  értéke 0, ha a 50% a valószínűsége annak, hogy az összefüggés alapján becsült gyorsulásérték nagyobb a valódinál, az érték 1, ha 84%, 2, ha 98%.

A számított eredményt a 9. ábrán láthatjuk, ahol az OVE ARUP tanulmányból vett, a 0,1-0,3 g tartományra vonatkozó eloszlásfüggvényt is ábrázoltuk. Hibás lett volna azonban a két szakasz eloszlásának bármelyikét a másik szakaszra extrapolálni. Nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a magnitúdó gyakorisági görbe a lehetséges legnagyobb magnitúdó közelében elveszíti linearitását.



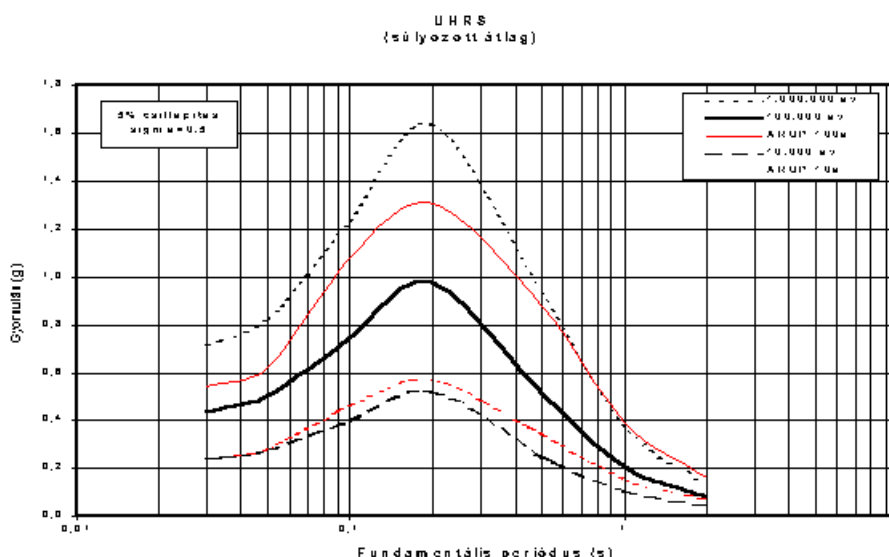
9. ábra: A maximális vízszintes gyorsulásértékre vonatkozó kockázati görbe



Pakson a telephely szeizmicitásának újraértékelése gyakorlatilag az első és egyetlen megfelelő teljes körű telephelyi jellemzés volt. Ezt kompromisszumok nélkül kellett elvégezni, mintha egy új erőművi telephely minősítéséről lenne szó. Az alapvető irányelvet a NAÜ 50-SG-S1 Rev. 1. dokumentuma képezte. (Több tagország gyakorlata szerint a tervezési alapba a  $10^{-4}$ /év gyakoriságú (10000 év visszatérési idő) földrengést kell meghatározni. A bizonytalanságokat 84 %-os értékekkel számolják.) A telephely sajátosságaira tekintettel a földrengés veszélyeztetettség értékelése valószínűségi módszerrel történt. 1996-ban befejeződött a telephelyi földrengés veszélyeztetettség értékelését megalapozó kutatás, és elkészült a maximális méretezési földrengésre, illetve a talajfolyósodásra vonatkozó értékelés [2], [3], [4], amit a hatóság is elfogadott. A teljes veszélyeztetettségi görbe a  $10^{-1}$ - $10^{-7}$ /év intervallumra, beleértve a talajfolyósodás jelenségének vizsgálatát is 2000-ben készült el [5]. Ez az utóbbi vizsgálat is jól reprodukálta az NBSZ szabályzás tárgyát képező és korábban elfogadott maximális méretezési földrengés (MMF) eredményeket.

Az Ove Arup tanulmány is közölt eredményeket (válaszspektrumokat, gpa-t) az 1/10000 év gyakoriságnál kisebb gyakoriságokra is, jóllehet maga az értékelés nem erre összpontosított. Ezek a 10. ábrán láthatók és referenciaként szolgáltak a veszélyeztetettség kiterjesztett vizsgálatához. Megállapítható, hogy az Ove Arup tanulmány a 10000 évnél rövidebb visszatérési idejű rengések gyakoriságát (jóllehet épp erre a tartományra jó a hazai földrengés-katalógus reprezentativitása) alulbecsli, míg az igen kis valószínűségű, 100000 éves visszatérési idejű rengéseket némileg felülbecsli, mint a legújabb eredményeket, így a mikroszeizmikus vizsgálatok és neotektonikai kutatások eredményeit is figyelembe vevő, új tanulmány [5].

**10. ábra: Legjobb becslésnek tekintett egyenletes kockázatú válaszspektrumok, 5% csillapításnál, 10.000-1.000.000 év visszatérési időkre**



### 3. Felszínre felnyúló törések

A NAÜ 50-SG-S1 (Rev 1) dokumentuma szerint a telephely alkalmasságának kizáró feltétele a felszínre kifutó elvetődés lehetőségének kizárása. A felszínre kifutó elvetődés definícióját és az értékelésre vonatkozó alapvető követelményeket dokumentum 604.-608. paragrafusai adják meg. Ennek megfelelően a telephely komplex földtudományi újraértékelésének

központi kérdése volt, hogy a telephely környezetében lévő szerkezetek aktívak voltak-e a jelen tektonikai rezsim során (2,5 millió év), azaz a telephelyen és környezetében felvett szeizmikus szelvényeken a Pannon rétegben látható számos törésvonal, amelyek 6 millió év előtti mozgásokra utalnak, aktívak voltak-e a negyedidőszak során. Az adatok alapján feltehető, hogy a törésvonalak általában NyDny-KÉK-i irányt követik, míg egyesek DNy-ÉK csapásúak.

A korábbi vizsgálatokból 1994 végén rendelkezésre álló adatok ellentmondásosak voltak:

- egy elég világos koncepció szerint a kecskeméti törés, mint neotektonikus törésrendszer folytatódása feltételezhető volt a telephely térségében,
- a telephelyen és környezetében felvett szeizmikus szelvényeken a Pannon rétegben látható számos törésvonal, amelyek 6 millió év előtti mozgásokra utalnak, aktívak voltak-e a negyedidőszak során.
- a negyedkori aktivitásra utaló addig felvett sekély-szeizmikus szelvényeket két független (angol, olasz) szakértő is értékelte, akik megállapították, hogy a meglévő szelvények minősége nem ad módot végleges következtetésre,
- a kvarter aktivitás ellen szólt az, hogy a terepi felvételező munka, a geoelektromos és földradar mérések szerint a negyedidőszakban, legalább annak felső szakaszában és a holocénben – azaz, az utóbbi mintegy 450000 évben – nem volt olyan méretű földmozgás Paks tágabb térségében, amelyen kétségtelenül kimutatható tektonikus szerkezeteket hozott volna létre a felszín közeli részletesen vizsgált rétegekben.

Felismerték azt is, hogy lévén a területen a kvarter jelentős időhézaggal települt a pannon rétegsorra és területi kifejlődése is nagyon változatos, így tehát a klasszikus megközelítés, azaz a pannon rétegeket egyértelműen harántoló vetők felhatolásának meghatározása nem hozhat direkt és véglegesen megnyugtató eredményt, ezért közvetett vizsgálatokra is szükség volt. Evidens volt, hogy az igényes sekély-szeizmikus szelvényezés mellett a vetőzóna olyan szakaszának megismerése vezethetne eredményre, ahol az üledéksor folytonos a pannon-kvarter határon, illetve a hasonló, ismert pannon szerkezetek kvarter aktivitásának vizsgálatából lehet indirekt módon ismerteket szerezni. Nyilvánvaló volt, hogy a mikroszeizmikus monitorozásnak igen fontos szerepe van a kérdés eldöntésében, de ehhez több éves adatgyűjtésre van szükség.

Az elvégzett elemzések alapján a kvarter aktivitás kizárására a közvetett és közvetlen bizonyítékok az alábbiak:

HORVÁTH F. és társai 1995-ben a Dunán felvett szelvényei igazolták, hogy a Pannon rétegekben meglévő törésvonal nem harántolja a fiatal rétegeket, egyetlen szeizmikus szelvényen sem hatolnak be ezek a törésvonalak a felső, legalább 45000 éves negyedkori rétegbe. A telephelyet borító negyedkori üledék fiatal kora miatt azonban nem lehet végérvényesen igazolni, hogy a törésvonalak nem aktívak, hiszen a definíció szerinti „jelen tektonikai rezsim” jóval meghaladja a 45000 évet.

Az érzékelési küszöböt tekintve a területen lévő törésvonalakon 0,05 mm/év és 0,1 mm/év közötti mozgási sebesség a geológiai és geofizikai adatok alapján nem kizárható, ugyanakkor semmilyen regionális geomorfológiai adat ezt nem igazolja. Jóllehet kevés adat áll rendelkezésre, de a telephelytől nyugatra lévő idősebb löszben sem találunk negyedkori töréseket. Ugyanakkor tekintettel a lösz kb. 0,9 millió évre tehető korára a negyedkori mozgási sebességek nem lehetnek nagyobbak, mint 0,02 mm/év.

A telephely körzetében, illetve a telephelyen végzett részletes geológiai, geofizikai vizsgálatok azt mutatják, hogy nincs nyilvánvaló jele a területen a negyedkori elvetődésnek. Ott, ahol adatok állnak rendelkezésre, a negyedkori üledék zavarmentes.

Egyetlen Pannon szerkezethez sem volt kapcsolható semmilyen mérhető aktivitás (bár a kevés adat alapján ezt akkor teljesen kizárni sem lehet, itt a mikroszeizmikus monitorozás adott érdemi információt). A Pannon rétegben a telephelyen feltárt szerkezetek nem egyediek, számos ilyen létezik a telephelytől északi és déli irányokban 30 km-en belül. A telephely 150 km-es körzetében megvizsgált negyedkori üledékekkel fedett pannon vetők nem harántolják a negyedkori rétegeket.

A közvetett adatok értékeléséből a hazai és külföldi szakértők megállapították, hogy geológiai és geomorfológiai bizonyítékok nincsenek a telephely alatt húzódó törésvonal aktivitására. Következésképp megállapítható, hogy a paksi telephelyen és környezetében a pannon rétegekben lévő szerkezetek igen nagy valószínűséggel nem aktívak, következésképp igen nagy valószínűséggel nem okoznak felszínre kifutó elvetődést.

A Paksi Atomerőmű környezetének vizsgálata az elmúlt több mint egy évtized során egy komplex földtani kutatássá fejlődött, mely számos új, fontos felismerést eredményezett. A mikroszeizmikus monitorozás adatainak komplex értékelése és annak összevetése a neotektonikai kutatások legújabb eredményeivel azt mutatja, hogy – bár a térség, sőt az egész medence recens viselkedése további vizsgálatok tárgya – a telephelyen a felszínre kifutó elvetődés lehetőségét ki lehet zárni (részletesebben lásd a következőkben).

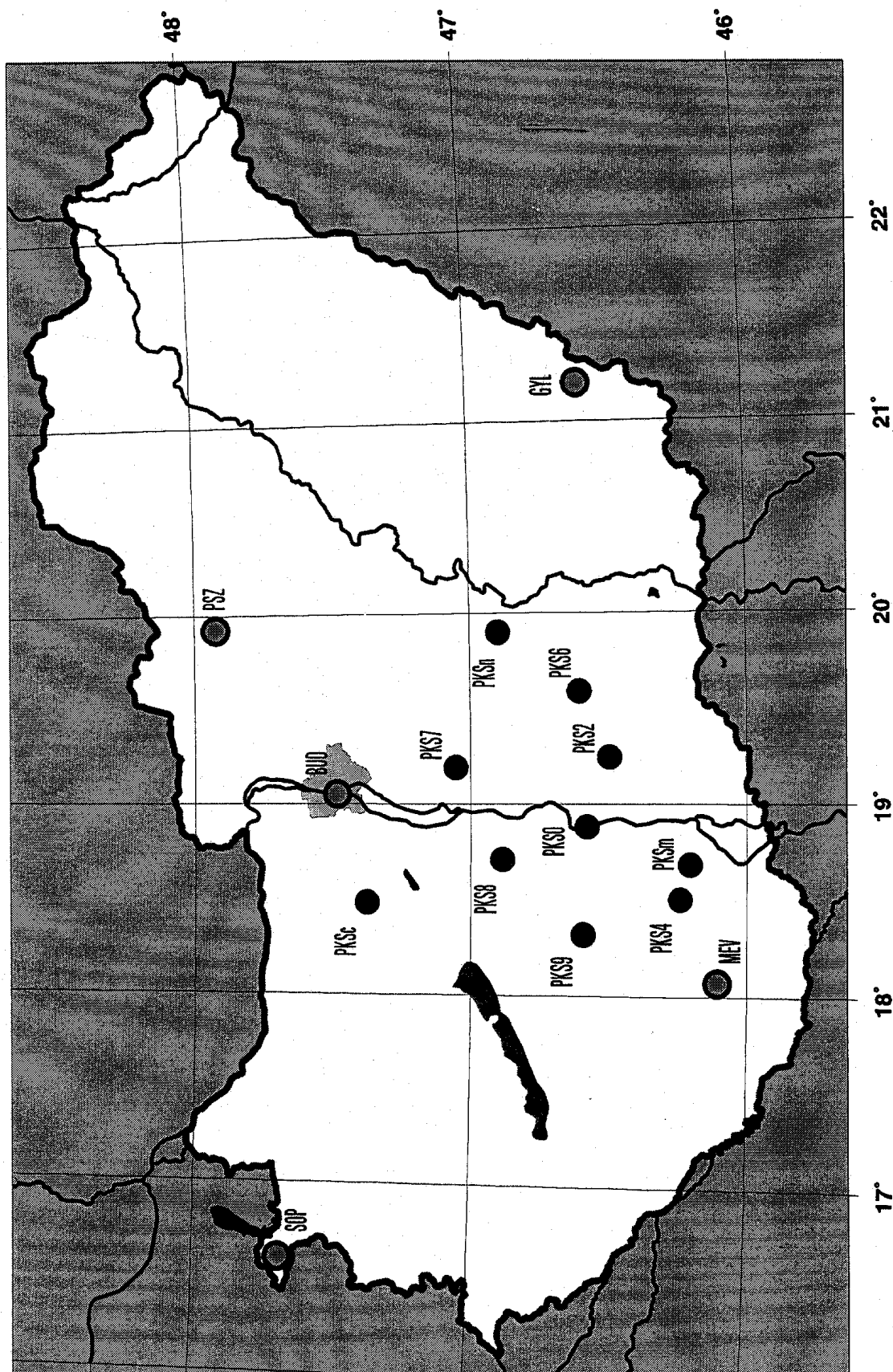
#### **4. A mikroszeizmikus monitorozás összefoglaló értékelése**

A magyarországi szeizmológiai hálózat detektálási és helymeghatározási képessége az ország területének nagy részén a legutóbbi időkig nem ment az érezhető földrengések szintje alá. A katalógusba kerülő adatok, melyek minden későbbi szeizmicitás vizsgálatok kiinduló pontjai, 1995-ig szinte kizárólag makroszeizmikus megfigyelésen alapultak. Nemzetközi tapasztalat mutatja (pl. Svájc, Skandináv országok), hogy nagyon érzékeny szeizmológiai megfigyelőrendszer kiépítése után egy régió földrengés tevékenységéről, aktív szerkezetek létéről és hollétéről, a recens feszültségviszonyokról alkotott kép alapvetően megváltozhat.

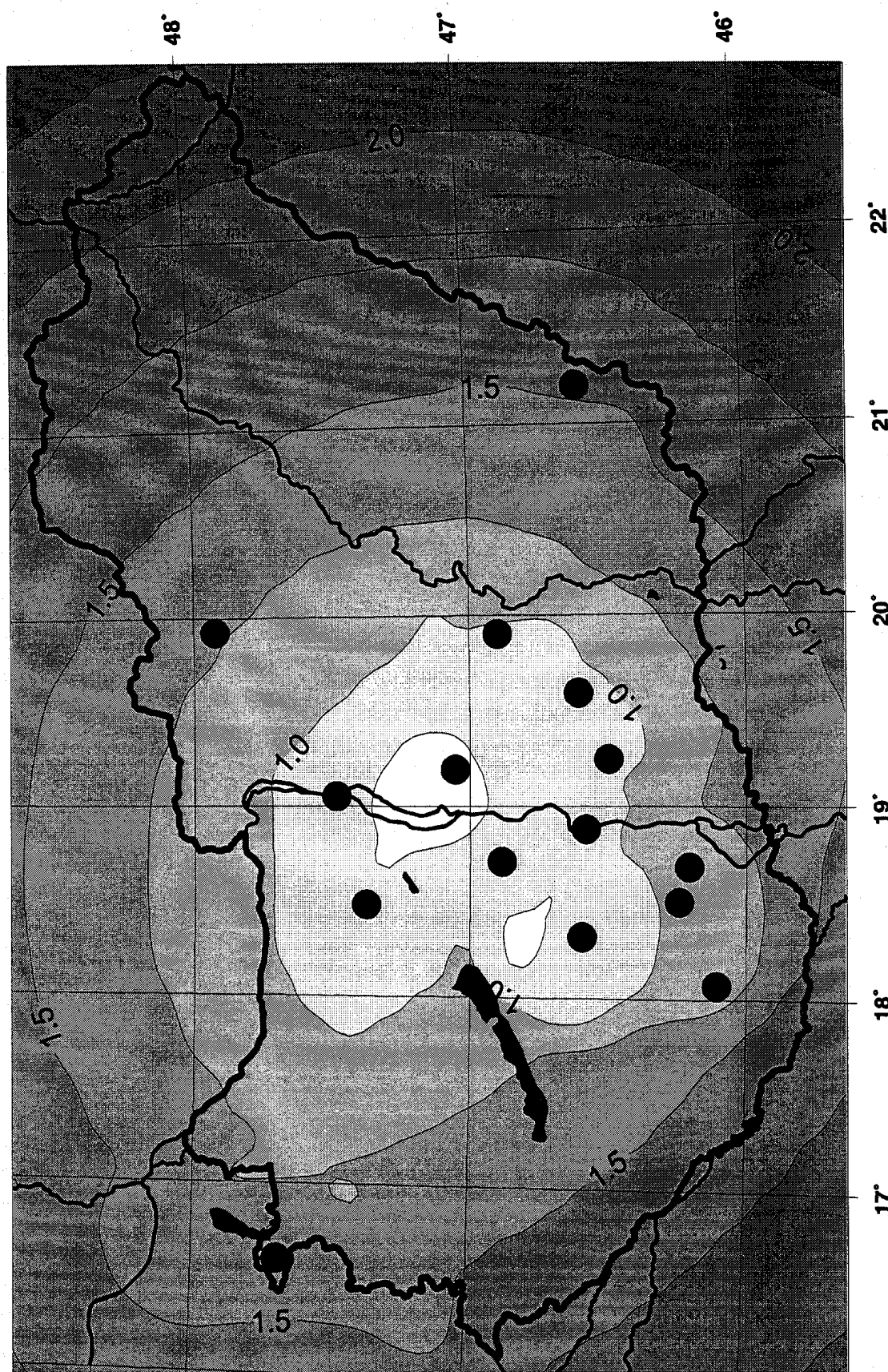
A NAÜ telephelyvizsgálat nemzetközi gyakorlatát általánosítva előírja az érzékeny mikroszeizmikus monitorozást a telephely-értékelés elengedhetetlen adatforrásaként, amelyet a jelenleg érvényes hazai szabályozás is tartalmaz.

A Paksi Atomerőmű tágabb környezete jelenkori szeizmicitásának tisztázására – a NAÜ ajánlásának megfelelően – tíz állomásból álló mikroszeizmikus megfigyelő hálózat került kiépítésre az erőmű kb. 50 km-es sugarú környezetében. A korszerű, digitális mérőállomások üzembe helyezése 1995. márciusában megtörtént, azóta az adatgyűjtés folyamatos, a mérési paraméterek finomítása mellett. A monitorozó hálózat állomásainak elhelyezkedését a 11. ábrán az érzékenység-eloszlást a 12. ábrán láthatjuk. A rendszer részletes műszaki leírását és az 1998. márciusáig gyűjtött adatok komplex értékelését a GEORISK Kft. 1999. júliusi keltezésű, „A PAE telephely és környezete mikroszeizmikus megfigyelései; Összefoglaló értékelés” c. jelentésében találjuk meg. A megfigyelő hálózat tervezése, létesítése, üzemeltetése és adatainak kiértékelése a legszélesebb körű hazai – és a PHARE programon keresztül külföldi – szakemberek bevonásával, a nemzetközi szeizmológiai gyakorlatban elfogadott szokásoknak megfelelően, teljesen transzparens módon történt.

11. ábra: A monitorozó hálózat állomásainak elhelyezkedése



12. ábra: A monitorozó hálózat érzékenységi eloszlása



A Paksi Atomerőmű mikroszeizmikus megfigyelő hálózata elsősorban a magyarországi, illetve a határ menti területek földrengéseit van hivatva megfigyelni, de fókuszálva a telephely 100 km-es körzetére. Ez a terület a 45.5–49.0 északi szélességi és 16.0–23.0 keleti hosszúsági koordinátákkal határolható. Paks tágabb környezetében – történelmi szeizmicitását figyelembe véve – várható volt, hogy átlagosan évente legalább 6-30 olyan méretű földrengés pattan ki, melynek magnitúdója  $M \geq 2$ . A jelzett területen 1995. január és 1998. március között 88 földrengést volt az  $ML = 0.6 - 3.7$  magnitúdó tartományban, hat rengés esetében a magnitúdót nem sikerült meghatározni. Az ARUP által definiált CLASS2, vagy D forrásterület az előzőekben meghatározott földrajzi ablaknál valamivel szűkebb, nem tartalmazza az Ausztria keleti részén Szlovákiai felé a Bécsi-medencén áthúzódó viszonylag aktív zónát, a szlovéniai Koprivnica környéki aktivitást, kisebb horvátországi területeket és a romániai Temesvár környéki bánáti forrásokat. Az ARUP tanulmányban definiált „CLASS2” területen 66 esemény volt. A rengések évenkénti számát a következő táblázat mutatja:

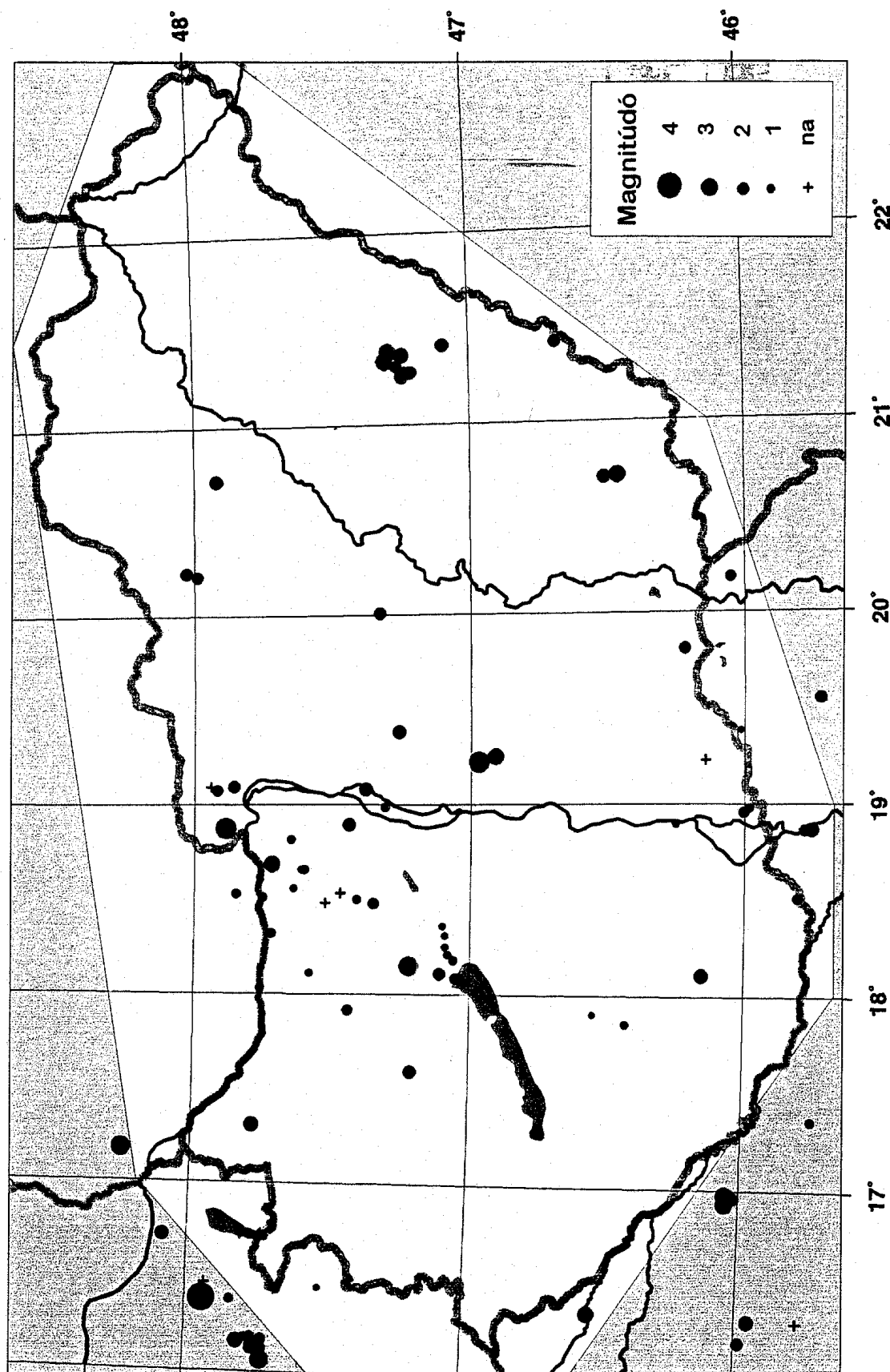
Időszak	Rengések száma
1995.	9
1996.	18
1997.	51
1998. jan. - márc.	10

A mikroszeizmikus monitorozó rendszer által detektált események eloszlását a 13. ábrán láthatjuk.

PA Rt. 1998-ban a monitorozás adatait bemutató és értékelő „statisztikai” jelentésen túl elvégeztette annak komplex értelmezését a negyedkori aktivitás kutatás aktuális eredményei környezetében. Tapasztalható, hogy a paksi telephely értékelése, ami integrálta az akkori a neotektonikai ismereteket, lendületet adott a jelenkori aktivitás kutatásának, új, a Pannon medence fejlődésére vonatkozó eredmények születtek az ürgeodéziai mozgásvizsgálatok, a feszültség elemzések és a neotektonikai kutatások terén. Természetesen ezek a vizsgálatok még a szakmai műhelymunka stádiumában vannak, ugyanakkor – együtt a mikroszeizmikus eredményekkel – egészében az ARUP jelentés helyességét erősítik meg. Az alábbiakban szó szerint idézzük az összefoglaló értékelés fő megállapításait:

1. A mikroszeizmikus megfigyelő hálózat tervezése, létesítése, üzemeltetése és adatainak kiértékelése a legszélesebb körű hazai – és a PHARE programon keresztül külföldi, British Geological Survey, OVE ARUP – szakemberek bevonásával, a korszerű nemzetközi szeizmológiai gyakorlatban elfogadott szokásoknak megfelelően, teljesen transzparens módon történt.
2. A megfigyelő hálózat alkalmasnak bizonyult a kitűzött cél szerinti  $ML \geq 2,0$  földrengések észlelésére, azonosítására és hipocentrumának meghatározására Paks 100 km-es környezetét meghaladóan az ország területének nagy részén. Ezt a háttérzaj alapján becsült észlelési képesség eloszlás már indikálta, a mérési időszak eredményeiből számított magnitúdó – gyakoriság görbe pedig egyértelműen bizonyítja.
3. A program során – bár a viszonylag mérsékelt szeizmicitás miatt a mérési adatok száma nem nagy – azonosított események alapján megállapítható, hogy a jelenkori földrengések nagyobbik része az eddig is ismert forrásokhoz kötődik. Ezek többsége jelenleg is mérhető aktivitást mutat. Olyan új ismeret eddig nem merült fel, mely a földrengéskockázat számításokhoz használt forrászóna beosztás újragondolását indokolná és megalapozottá tenné.

13. ábra: A mikroszeizmikus monitorozó rendszer által detektált események eloszlása



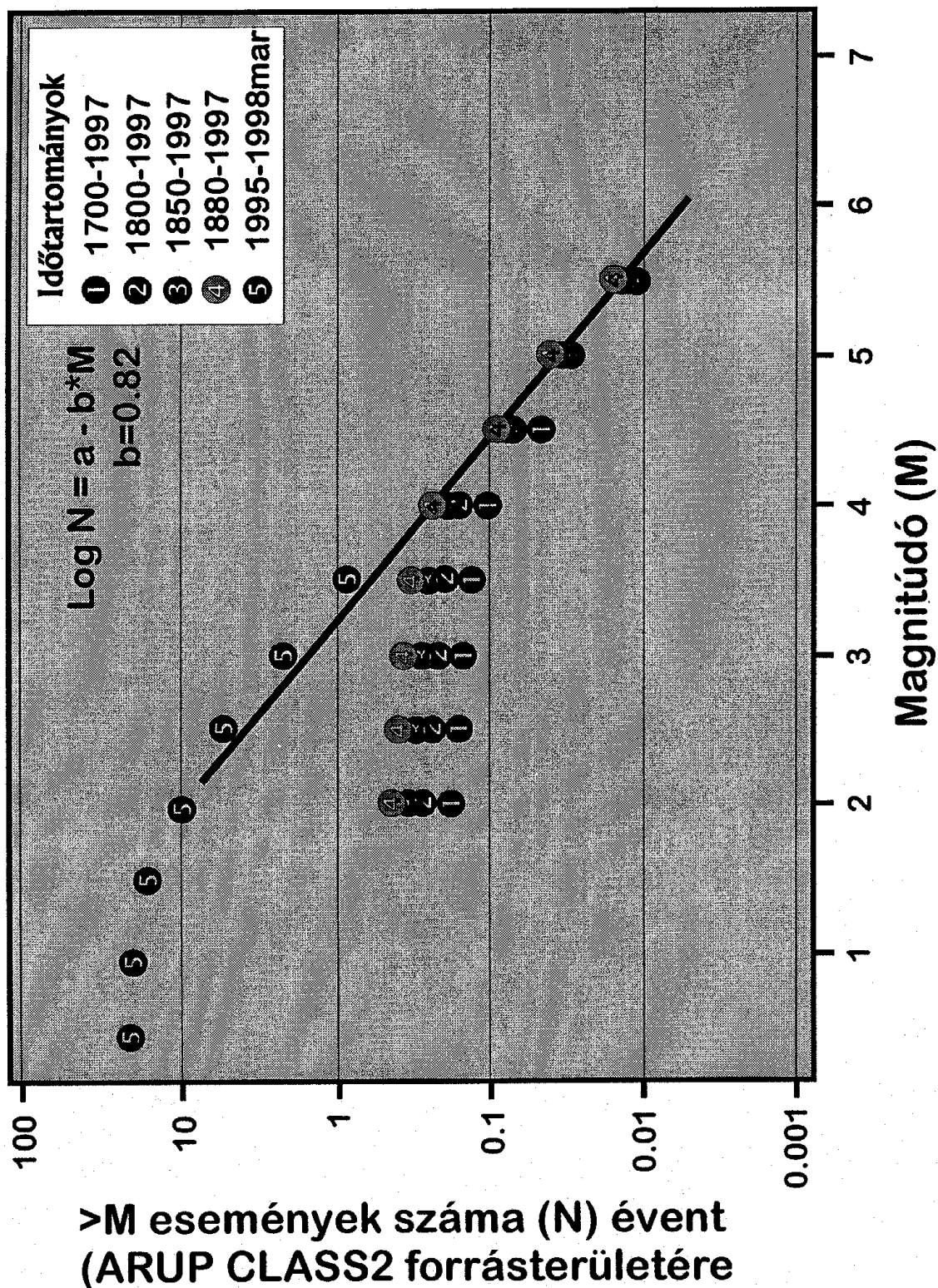


4. Figyelembe véve a mérőhálózat észlelési képességének Paks környéki fókuszáltságát, nagy biztonsággal kijelenthető, hogy a megfigyelési időszak alatt Paks 50 km-es környezetében nem volt olyan földrengés, melynek magnitúdója elérte volna az  $ML \geq 1,0$  értéket.
5. A földrengések fészekmechanizmusa alapján az általános feszültségtérre jellemző fő nyomási tengelyek a Bécsei-medencében egyértelműen É-D irányúak, a Dunántúli-középhegység térségében pedig az ÉK-DNy irány mutatkozik szignifikánsnak.
6. A Pannon medencében jelenleg is van feszültség-felhalmozódás, mely bizonyos, többé vagy kevésbé ismert szerkezeti vonalak mentén időnként kioldódik. A keletkező földrengések nagysága attól függ, hogy a feszültségek hatására az egyes szerkezeti elemek milyen könnyen tudnak egymáshoz képest elmozdulni. Korábbi tektonikai és szeizmológiai ismereteink alapján arra következtethetünk, hogy a medencealjzat nagymértékű töredezettsége miatt nagy feszültség csak kis valószínűséggel halmozódhat fel. Ezzel magyarázható az 5,5 magnitúdónál nagyobb rengések ritkasága és az eddig tapasztalt 6,0 magnitúdó körüli felső korlát is. A monitorozás eredményeképpen lényegesen pontosított  $\log N = a - bM$  reláció (14. ábra) ugyanakkor világossá teszi, hogy a 6-os magnitúdójú esemény visszatérési gyakorisága két-háromszáz év. A vizsgálatok azt mutatják, hogy a potenciáltér-anomáliák által jelzett tektonikai viszonyok a földrengés epicentrumokkal szoros összefüggést mutatnak. A földrengések elsősorban az anomáliák által jelzett törések jellegzetes pontjaihoz (elvégződés, irányváltozás, törések találkozása) kapcsolódnak.
7. A Pannon medence a tektonikai reaktiváció állapotában van a negyedidőszak során. A legújabb tektonikai és geodéziai eredmények, valamint szeizmikus interpretációk ezt a megállapítást egyértelműen megerősítik, sőt valószínűsítik, hogy úgy a vertikális, mint a horizontális mozgások recens átlagsebessége a mm/év nagyságrendben van. Ez az érték egy-két nagyságrenddel nagyobb annál, amit az OVE ARUP rizikóanalízise során a vetők menti elmozdulás-sebességre (slip rate) feltételezett. Mindebből még nem lehet messzemenő következtetéseket levonni a PAE telephelyének szeizmikus veszélyeztetettségére, mert a monitorozás eredménye azt a biztató képet mutatja, hogy a telephely jelentős környezetében nem volt a vizsgálati időszak alatt az érzékenységi szintet meghaladó szeizmikus tevékenység.
8. A mikroszeizmikus megfigyelő hálózat eredményei a közvetlen ipari hasznosításon túlmenően több általános kutatási programba beépültek, ezen keresztül komoly hozzájárulással szolgálnak az egész hazai földtudományi megismeréshez, melyet számos tudományos publikációban történt hivatkozás tükröz.
9. Mind a már működő, mind a paksi telephelyen és a régióban tervezett új objektumok indokolttá teszik a szeizmikus kockázat megismerésének finomítását, a folyamatos adatgyűjtést, a tudományos és módszertani fejlődés legújabb eredményeit is figyelembe véve. Ehhez a mikroszeizmikus megfigyelő rendszer unikális inputot szolgáltat. A PHARE Program ajánlásaival összhangban szükségesnek tartjuk a földrengés megfigyelő hálózat további működtetését.

Az elkészült értékelés összefoglaló megállapításai kommentálva megállapíthatjuk az alábbiakat:

Az összefoglaló 3. megállapítása a mikroszeizmikus események alapján megerősíti az OVE ARUP jelentésbeli forrászóna-beosztás helyességét. A 4. pont pedig kimondja, hogy a telephely körzetében mikroszeizmikus eseményt nem regisztráltak. Mindkét megállapítás kardinális az OVE ARUP akkori értékelésének helytállósága szempontjából.

14. ábra: A monitorozás eredményeképpen lényegesen pontosított logN=a-bM reláció



Az 5. és 6. pont együttesen az OVE ARUP jelentésbeli szeizmotektonikai képet igazolja. A mikroszeizmikus események alapján pontosított gyakoriság-magnitúdó eloszlás alapján kimondható, hogy ez a szeizmicitás értékelésében alapvető szerepet játszó összefüggés az OVE ARUP elemzésekben helyes és konzervatív, ami például a maximális lehetséges földrengések magnitúdó-értékének konzervatív voltában is mutatkozik.

A 7. következtetés szorul részletesebb kifejtésre. A tektonikai reaktivációra vonatkozó megállapítás a Pannon medence jelen tektonikai rezsim alatti, negyedidőszaki fejlődésére vonatkozik. Ezt az elméletet alátámasztani látszik az újabb sekély-szeizmikus szelvényezés és feszültség elemzéseken kívül egy, az egész Dunántúlt közel É-D irányban középen harántoló bázisvonalon ürgeodéziai módszerrel végzett mozgásmérés is. Ezekből az sejthető, hogy a medence belsejében a korábbiakban feltételezettnél nagyobb mozgási sebességek vannak. A szerzők azonban nem tartják szükségesnek az ARUP jelentés e ponton való felülvizsgálatát. Ennek egyik oka, hogy még hosszú évek kutató munkájára van szükség egyfelől a mérési adatok teljessé tételéhez, a pontosság növeléséhez, például ahhoz, hogy az ürgeodéziai mérésekkel a medencére jellemző mozgásokat feltérképezzék. Másfelől pedig nincs feltétlenül ellentmondás az ARUP által a telephely környezetében lévő szerkezetekre meghatározott konkrét elmozdulás adatok és a legújabb mérésekből feltételezhető, a medence globális viselkedésére utaló adatok között. A mikroszeizmikus monitorozás eredménye épp azt mutatta ki, hogy Paks környezetében a korábbi feltételezés helyes. Az ARUP jelentésben a telephely alatti vonalas forrás a valószínűségi földrengéskockázat számításban kis súllyal szerepelt, amellyel a hazai szakértők egyetértettek (lásd a Balla Z. és Tóth T.-Horváth F. 1999. évi vitacikkeit a Földtani Közlönyben). A Pannon medence neotektonikájának ismertsége a közelmúltban igen sokat fejlődött, intenzív műhelymunka stádiumában van, a szakértők azonban mégsem várnak az elkövetkező évek során olyan, minden oldalról igazolt, új felismerést, ami miatt az ARUP jelentés értékelésének robusztus és konzervatív volta megkérdőjelezhető lenne.

Összességében: a mikroszeizmikus monitorozás eredményei megerősítették, azt a korábbi következtetést, hogy a telephelyen a recens aktivitás kizárható, továbbá a maximális méretezési földrengés értékelésénél felvett modelleket és jellemzőket is.

Tény, hogy a PA Rt. mikroszeizmikus rendszere az ország egyetlen mikroszeizmikus monitorozó hálózata, ennek működtetéséhez alapvető tudományos érdek fűződik. Az is belátható, hogy a Pannon medence fejlődésének kutatása hosszabb megfigyelési időt igényel, sőt várható az is, hogy a földtudomány fejlődése során még viták pattanhatnak ki a negyedidőszaki aktivitás és a szeizmicitás tárgyában. Ezekben a vitákban döntő jelentősége lehet a mikroszeizmikus monitorozás eredményeinek. A fentiek miatt PA Rt. a mikroszeizmikus monitorozást folytatja.

## **5. A telephely mérnökgeológiai és talajtani viszonyai**

A telephelyre vonatkozó geotechnikai adatok három forrásból származnak:

- A létesítést megelőzően, illetve az építés során részletes talajmechanikai geotechnikai feltárás történt. Ez a feltárás az építés akkori igényeit kielégítette. Az épületek mozgását, süllyedését rendszeresen és módszeresen ellenőrizték és ellenőrzik, amiből lényegében megállapítható, hogy az akkori talajmechanikai adatfelvétel és az arra támaszkodó alapozás-tervezés korrekt volt.

- Jórészt hagyományos, a magyar építési gyakorlatnak és követelményeknek megfelelő talajmechanikai vizsgálat történt a KKÁT területén. A KKÁT esetében a maximális méretezési földrengésre jellemző maximális vízszintes talajgyorsulás 0,35 g volt. Emiatt számolni kellett talajfolyósodással és jelentős dinamikus süllyedéssel. Az alapozás alatt a talajfolyósodás kizárása érdekében talajstabilizációt végeztek. A hagyományos talajmechanikai feltárás mellett jelentős dinamikus szondázást végeztek, mivel az erre megadott kritérium alapján ítélték meg a talajstabilizáció megfelelőségét. A CPT (Cone Penetration Test) eljárással is végeztek dinamikus vizsgálatokat. Mind a CPT, mind pedig a dinamikus szondázás adatait tulajdonképpen a SPT (Standard Penetration Test) adatokhoz, mint nemzetközileg elfogadott dinamikus jellemzőhöz viszonyították.
- A telephelyi szeizmicitás újraértékelése, a maximális méretezési földrengés jellemzőinek és a talajfolyósodás lehetőségének értékelése, valamint a talaj-épület kölcsönhatás miatt kiterjedt talajmechanikai vizsgálat történt, mindenekelőtt az alakváltozástól függő dinamikai jellemzők meghatározására.

#### ***a.) Az alapvető rétegtrend:***

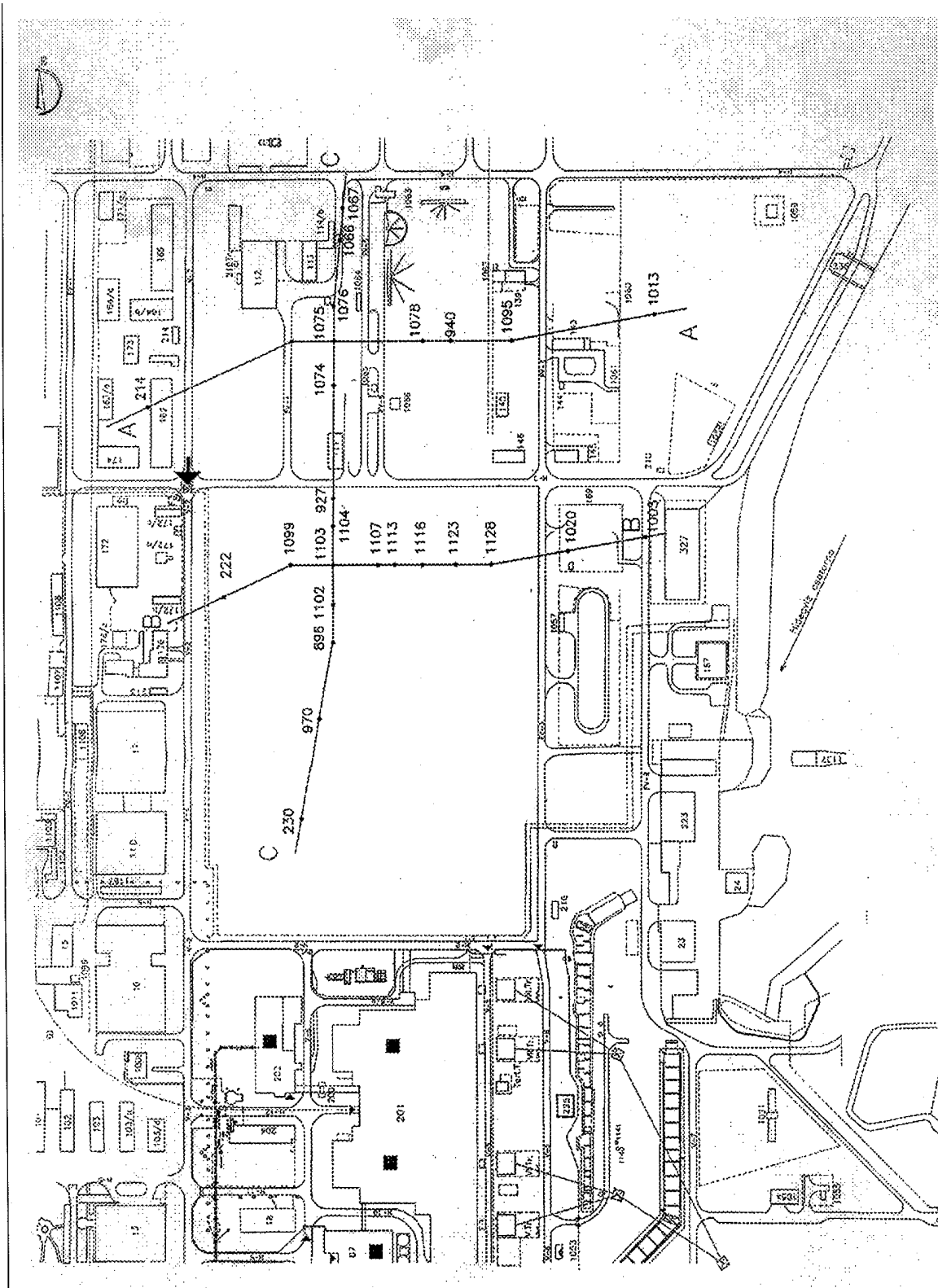
A humuszos felső réteg alatt mintegy 25-30 m vastag pleisztocén rétegegyüttes, melynek felső 12-15 m-es része árvízi elöntésből származó finomabb szerkezetű, jól osztályozott homok. Alsó része homokos kavics, kavicsos, kavicszórványos homok. Ennek vastagsága 15-20 m. A felső szintet a Duna a holocén időszakban átmosta és ismét homokot, öntésiszapot, öntésagyagot rakott le. A 7-9 m közötti mélységben a régi holtágak mocsárlápjait lokálisan előforduló szerves iszapok, tőzeglencsék jelzik. A pleisztocén rétegek alatt tavi eredetű, változatos kifejlődésű felsőpannon rétegek találhatóak. Finomszemű homokból, kőzetlisztből, agyagból, agyagmárgából állnak, rendszertelenül homokkő padok által tagoltak. E padok változóan cementálódtak, fél-kőzetnek tekinthetők.

#### ***b.) Az előforduló talajok helyzete, fúrás- és rétegszelvények***

A 15. ábrán látható a 4. blokktól északra lévő szabad terület, ahol a mérnökgeológiai szelvényezés történt. A szelvényeket a 16., 17., 18. ábrákon láthatjuk. Az előforduló talajokat mérnökgeológiai szempontból a következőkben ismertetjük:

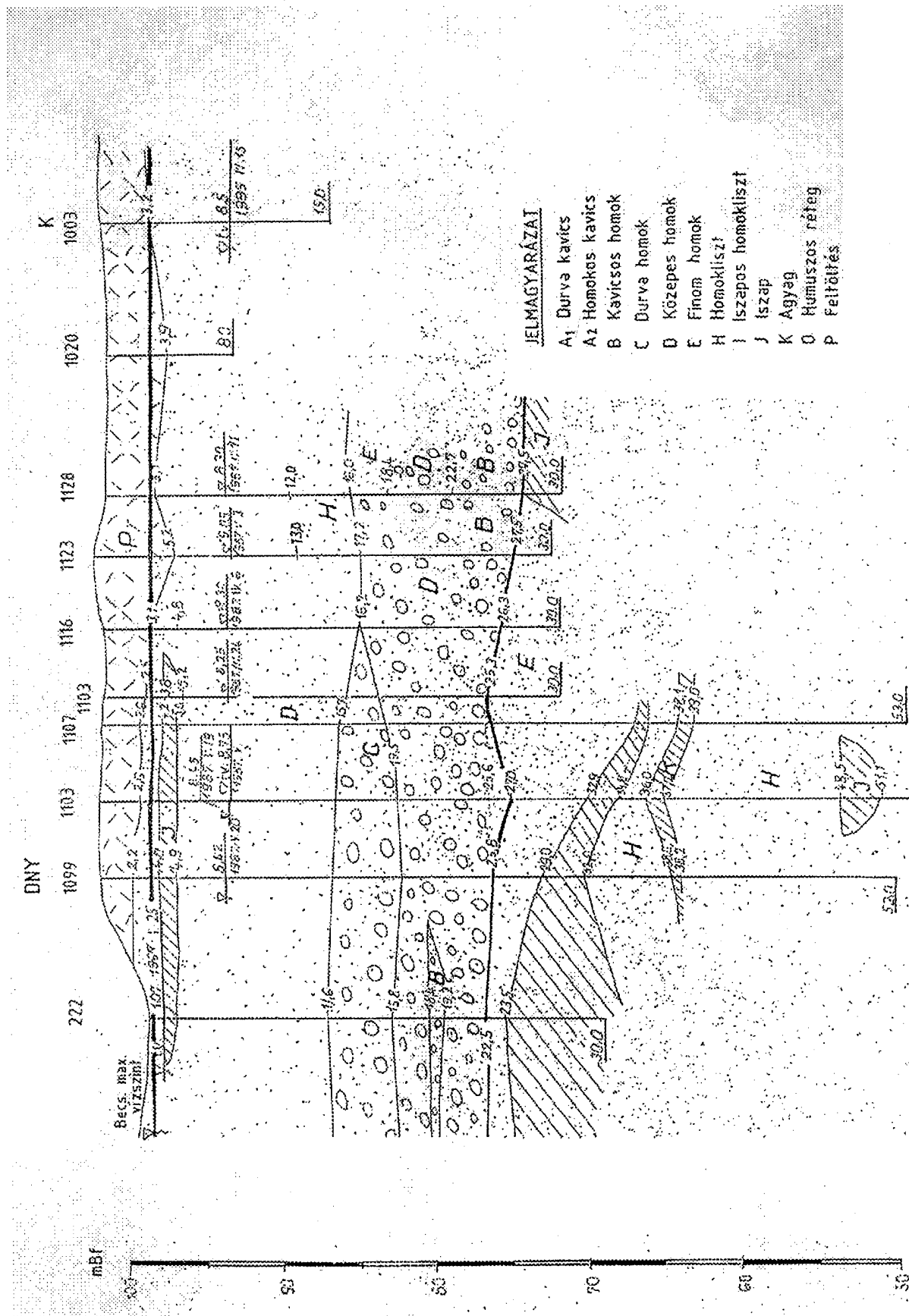
Homok feltöltést és humuszos homokot csak lokálisan észleltek 0,2-5,2 m vastagságban. A 74-82 mBf szintig feltárták az ártéri szintet alkotó változatos színű homokréteget, mely szemcsemérete alapján finom- és közepes homok. A homokba közbetelepülve nagy kiterjedésben észleltek szerves, szerves-nyomos és puha rétegeket. A közbetelepült rétegek: Puha állapotú agyag, iszap, homokos iszap, iszapos homokliszt 0,2-1,4 m vastagságban. 0,2-1,2 m vastagságban szerves-nyomos, szerves homok, kompresszibilis, puha szerves agyag és iszap. A durva szemcséjű teraszüledéket kavicsos homok és homokos kavics képviseli. Felszíne nem egyenletes, a felszínét a fúrások 74-82 mBf szintek között tárták fel. A paksi tapasztalatoknak megfelelően a szemcseösszetétel a térben erősen változik, a kavicsstartalom erős szórást mutat. A 30-50 m mélységű fúrások egyértelműen tisztázták a pannon rétegegyüttes felszínének helyzetét. Felszíne a terepszint alatt 21-28 m mélységek között, 69-73 mBf szinten van. A rétegegyüttesről alkotott korábbi képpel egyezően itt is a finom rétegzettség, a különféle kifejlődésű rétegek gyors váltakozása jellemző a tavi üledékképződési körülményeknek megfelelően. Közvetlenül a telephelyen a löszfrakció jelenlétéről nincs tudomásunk.

15. ábra: A mérnökgeológiai, geotechnikai vizsgálati terület

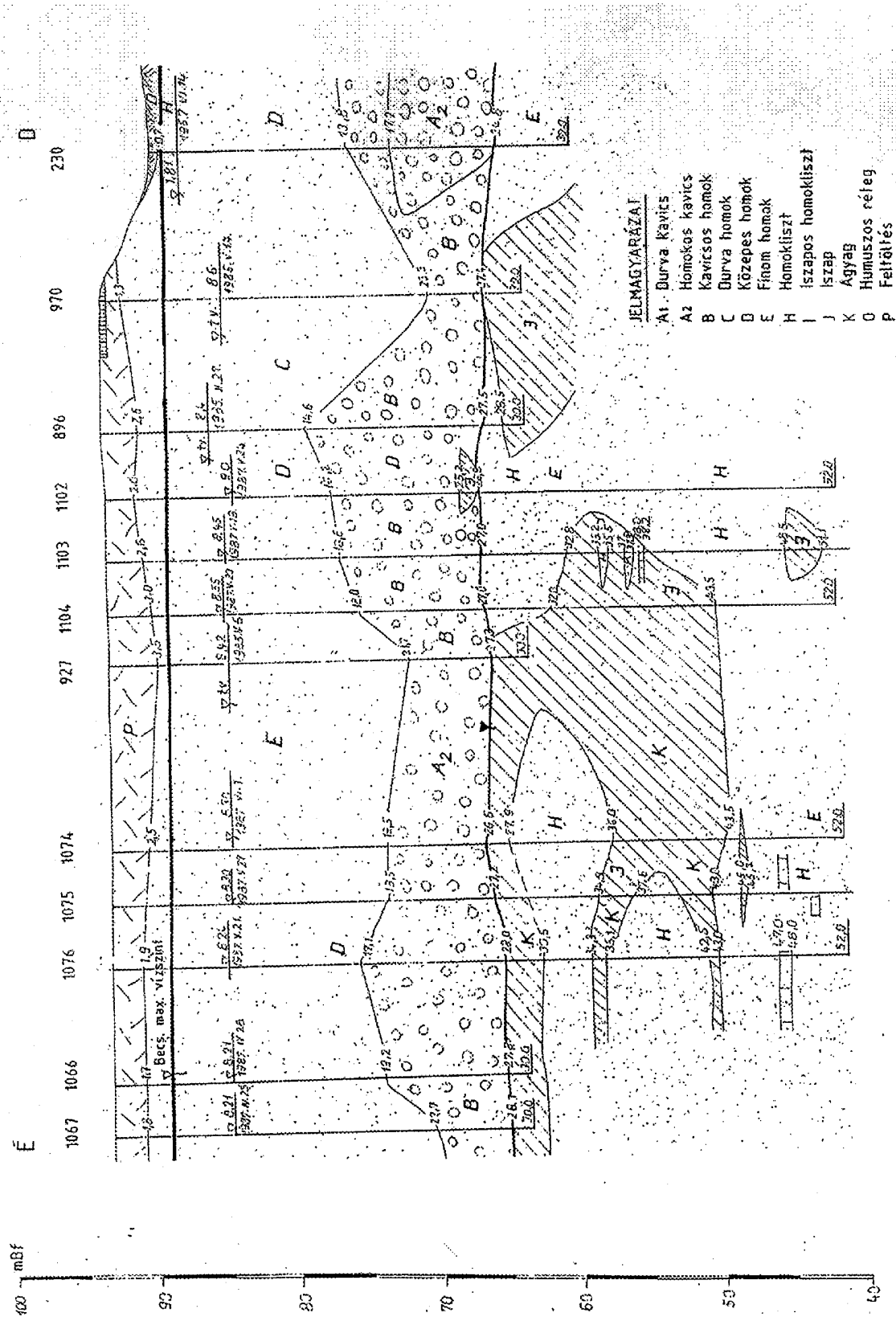




17. ábra: Mérnökgeológiai szelvény



18. ábra: Mérnökgeológiai szelvény





## Az egyes talajok talajfizikai jellemzői

A talajok fizikai, mechanikai tulajdonságait laboratóriumi kísérletekkel, a szemcsés talajok tömörségét helyszíni (dinamikus) kísérletekkel határozták meg. A talajadottságok miatt a laborkísérletek túlnyomó többsége szemeloszlási vizsgálat, kisebb számban a plasztikus tulajdonságok meghatározása volt. Utóbbit Casagrande módszerével végezték. A talajosztályozás a magyar szabványok (MSZ) szerint történt azzal a különbséggel, hogy a szemeloszlási görbéket az értelmezhetőség érdekében a BS (British Standard) szerint dokumentálták. A szemcsés talajok nyírószilárdságát zavart állapotú mintákból határozták meg gyors nyírókísérletekkel (nyírási sebesség 1,2 mm/perc; minta felülete 48 cm<sup>2</sup>; hézagtenyező  $e=0,65$ ). A talajrétegek minősítését az alábbiakban közöljük:

### 1. Homok feltöltés és humuszos homok

Laza állapotú, heterogén összetételű, alapozásra nem alkalmas felszíni rétegek.

### 2. Pleisztocén rétegek

#### Felső szintek

##### Homok

A szondázási adatok és a fúrési ellenállás alapján közepesen tömör, egyes mélyebb szintjeiben tömör állapotú réteg. Finom és közepes homoknak minősíthető. Talajvíz alatt telített állapotú, szemszerkezete miatt erózió-érzékeny. Szeizmikus hatásra megfolyósodásra hajlamos.

Mértékadó szemcseátmérő	$d_m=0,11-0,29$ mm
Egyenlőtlenégi mutató	$U=1,9-9,9$

Gyakorlatilag iszapmentes, helyenként kissé iszapos (3-5 %), iszapcsomós (9-15%). Térfogatsűrűsége korábbi geofizikai mérésekkel meghatározva  $\rho=1,87-2,10$  t/m<sup>3</sup> között változik.

Súrlódási szög	$\varphi=27-34^\circ$
Kohézió	$c=0$

Vízáteresztő-képességi együttható  $k=1,2 \times 10^{-2}-9,8 \times 10^{-3}$  cm/s, (Szemeloszlásból számított érték)

A statikus (gravitációs) terhelések során figyelembe vehető összenyomódási modulus ( $E_s$ ) értéke az elmúlt 15 év tényleges in situ kísérleteinek statisztikusan feldolgozott eredményei alapján a réteg felső zónájára  $E_s=18-23$  MN/m<sup>2</sup>, mélyebb szintjére  $E_s=25-33$  MN/m<sup>2</sup> értékben adódnak. A gyakorlatban a homokra alapozott szerkezetek süllyedésének nagyságrendjét (végső soron az összenyomódási modulus) félig empirikus összefüggések alapján lehet becsülni. A meglévő reaktor-blokkok mért átlagos süllyedéseiből (55,5-72,6 mm) számított átlagos összenyomódási modulus  $E_s=85-111$  MN/m<sup>2</sup> értékre adódott. (A határmélység 47,0 m volt.)

**Közbetelepült rétegek:****Iszapos homokliszt**

Közepesen tömör településű, kis plaszticitású, a szemcsés és kötött talajok között átmenetet képező talaj.

Mértékadó szemcseátmérő	$d_m=0,03-0,09$ mm;
Egyenlőtlenégi mutató	$U=4,2-21,0$
Iszaptartalom	10-38%
Plasztikus index	$I_p=4-10\%$
Konzisztencia index	$I_c=0,8-1,0$ talajvíz felett $I_c=0,3-0,6$ talajvíz alatt
Térfogat sűrűség	$\rho=1,90-1,97$ t/m <sup>3</sup>
Hézagtenyező	$e=0,48-0,78$
Súrlódási szög	$\varphi=22-32^\circ$
Kohézió	$c=0-8,8$ kN/m <sup>2</sup>
Telítettség	$S_r=0,86-0,99$
Vízáteresztő-képességi együtth.	$k=(1,2-3,6)\times 10^{-4}$ cm/sec

**Iszap**

Erősen változó konzisztenciájú, kompresszibilis réteg.

$I_p=12-16\%$	$\varphi=30^\circ$ (kísérletből)
$I_c=0,2-1,1$	$c=16,8$ kN/m <sup>2</sup> (kísérletből)
$\rho=1,95$ t/m <sup>3</sup>	$E_s=7,3$ MN/m <sup>2</sup> (számított)
$e=0,85$	$E_s=6,8$ MN/m <sup>2</sup> (kísérletből)
$S_r=1,0$	

**Agyag**

Az iszappal egyező tulajdonságú.

$I_p=17-18\%$
$I_c=0,5-0,8$
$E_s=5,7-10,6$ MN/m <sup>2</sup> (számított)

Az alacsony konzisztencia-indexek nemcsak a puha állapotnak, hanem a talajvíz alóli mintavétel elkerülhetetlen hatásának tulajdoníthatók.

**Szerves iszap**

$W=51-93\%$	$\rho=11,41$ t/m <sup>3</sup>
$W_L=53-116\%$	$e=2,78$
$W_p=33-95\%$	$S_r=0,91$
$I_p=19-21\%$	$E_s=1,9$ MN/m <sup>2</sup> (kísérletből)
$I_c=1,1$	
Szervesanyag-tartalom:	$I_{om}=4,2-25\%$

Szerves agyag

$W=39-115\%$                        $\rho=1,42-1,68 \text{ t/m}^3$   
 $W_L=60-178\%$                      $e=1,32-2,65$   
 $W_p=30-110\%$                      $S_r=0,90$   
 $I_p=28-68\%$                        $E_s=3,3-4,3 \text{ MN/m}^2$  (kísérletből)  
 $I_c=0,6-0,9$   
 Szervesanyag-tartalom:     $I_{om}=5,9-30,0\%$

Mindkét fenti réteg nagyon kompresszibilis, puha, nagyon laza, kis teherbírású.

Szerves, szerves szennyeződésű homok

$U=2,9-3,1$   
 $d_m=0,14-0,15 \text{ mm}$   
 Szervesanyag-tartalom:     $I_{om}=0,8-3,4\%$

**Alsó szint:**

Durvaszemcsés pleisztocén rétegek.

Kavicsszórványos, kavicsos homok

5-34 % kavicsot tartalmazó durva szemcséjű homok. A tapasztalatok szerint tömör településű, jó teherbírású.

$d_m=0,28-1,80 \text{ mm}$                  $U=3,2-18,2$   
 $\varphi=30-34^\circ$  (kísérletből)         $c=0$   
 $E_s=40-45 \text{ MN/m}^2$  (a korábbi vizsgálatok alapján statikus terhelésre)

Homokos kavics

Tömör településű, jó teherbírású

$U=3,8-47,4$                              $d_m=0,42-11,26 \text{ mm}$   
 $E_s=60-80 \text{ MN/m}^2$  (korábbi vizsgálatok alapján statikus terhelésre)

**3. Pannon öszletbe tartozó rétegek**Homok, gyengén cementált homokkő

$U=2,1-2,4$                             Törőszilárdsági (régi kísérlet)  
 $d_m=0,11-0,16 \text{ mm}$                  $R_c=125-227 \text{ kN/m}^2$   
 $\varphi=30^\circ$  ( $e = 0,65$ )

Homokkő

$e=0,34-0,73$   
 $S_r=0,61-0,84$   
 $\rho=1,89-2,13 \text{ t/m}^3$

Törőszilárdság  $R_c=2096 \text{ kN/m}^2$  (kísérletből)

### Iszapos homokliszt

$U=2,3-10,4$	$\rho=2,13-2,14 \text{ t/m}^3$
$d_m=0,04-0,08 \text{ mm}$	$\varphi=34^\circ$
$I_p=9\%$	$e=0,48$
$I_c=1,1$	$S_r=0,86-0,93$
	$E_s=15,3 \text{ MN/m}^2$

### Iszap

$I_p=10-14\%$	$E_s=11-18 \text{ MN/m}^2$
$I_c=1,3$	(Tapasztalati képletből számítva)

### Alsó pleisztocén vörös agyag

$I_p=19-26\%$	$\rho=1,87-2,10 \text{ t/m}^3$
$I_c=0,8-1,4$	$\varphi=24^\circ$
$e=0,53-0,90$	$c=31,9 \text{ kN/m}^2$
$S_T=0,83-0,97$	$E_s=11,2-28,9 \text{ MN/m}^2$

Presszióméteres kísérletek alapján a pannon rétegegyüttes felső 15-20 m-es rétegére  $E_s=40 \text{ MN/m}^2$ , alatta fokozatosan növekvő értékű a statikus terhelésre érvényes összenyomódási modulus. A területen a csökkentett nyírási modulus  $G=123 \text{ MN/m}^2$ .

## **A talajrétegek dinamikai jellemzői**

Az 1994-95. évi vizsgálati programnak egyik igen fontos, a korábbi hazai kutatások során elhanyagolt területe volt a telephely geotechnikai jellemzőinek meghatározása, különös tekintettel a mértékadó földrengés szabadfelszíni jellemzőinek, a talajfolyósodásnak és az épület alapozás stabilitásának vizsgálatához nélkülözhetetlen.

A telephely geotechnikai feltárása az alábbiakat jelentette:

1. az összes meglévő talajmechanikai adat (fúrások, dinamikus szondázás, statikus jellemzők, stb.) összegyűjtését, rendszerezését és számítógépes feldolgozását,
2. új vizsgálatok keretében pedig SPT és CPT profilok felvételét, rétegleírásokat, a nyíróhullám sebességének, a Poison-tényezőnek, a nyírási  $G$  modulus, illetve a csillapítás meghatározását az alakváltozás függvényében rétegenként, szemcseméret és sűrűségeloszlás meghatározását, a szilárdsági jellemzők (kohézió,  $\varphi$ ) megállapítását

A telephely geotechnikai feltárási programja a tárgyra vonatkozó NAÜ 50-SG-S9 előírást követte.

A vizsgálatokat

- az ISMES olasz cég az OVE ARUP, mint a PA Rt mérnöke műszaki ellenőrzése mellett
- a belga OREX cég a BELGATOM, mint a PA Rt mérnöke műszaki ellenőrzése mellett

végezte, hazai cégek közreműködésével.

A vizsgálatokra az atomerőmű 4. blokkjától 150 m-re É-ra kijelölt 200 m x 200 m-es terület szolgált, lásd a 15. ábrát. A 15. ábrán körvonalazott terület feltérési programját a 19. ábrán láthatjuk.

Ahogy az a fentiekből is látható, az atomerőmű területén a 97 m Bf rendezett terepszint alatt kb. 8 m vastag feltöltés (96.84-97.18 m Bf között) változóan laza homok, iszap és laza anyag, van. A 92.63-96.34 m Bf alatt, átlagosan 19 m vastagságú, folyó által kialakított, közepes sűrűségű, illetve tömör iszapos homokból, illetve a mélyebb szinteken kavicsos homokból álló negyedkori réteg van, amelynek Ny-felé egy teraszt képez, kora legalább 45000 év, 69.53-70,34 m Bf alatt pedig nagy sűrűségű Pannon üledék található. A talajvízszint a Duna vízszintjével változik, de ingadozása mérsékeltebb, minimális szint 85.2 m Bf, maximális 90,1 m Bf, tervezési értéknek a 89 m Bf szintet lehet kijelölni.

### **A vizsgálati program áttekintése:**

#### CPT tesztek:

A CPT tesztek a 15. ábrán jelölt területen 27 helyen, duplikálva, az 1-4. blokk főépület komplexum körül 17 helyen, háromszorozva történtek. A CPT szondázás az 1-4. blokk épület-komplexuma körül (20. ábra) abból a célból történt, hogy

- ellenőrizhetők legyenek az építés előtt, a főépület által elfoglalt területen végzett furások adatai,
- az újonnan felvett geotechnikai szelvények, adatok, illetve az ezekre épülő következtetések a blokkok által elfoglalt területekre kiterjeszthetők legyenek.

A próbákat mechanikus és elektromos kúpokkal végezték.

#### Fúrások:

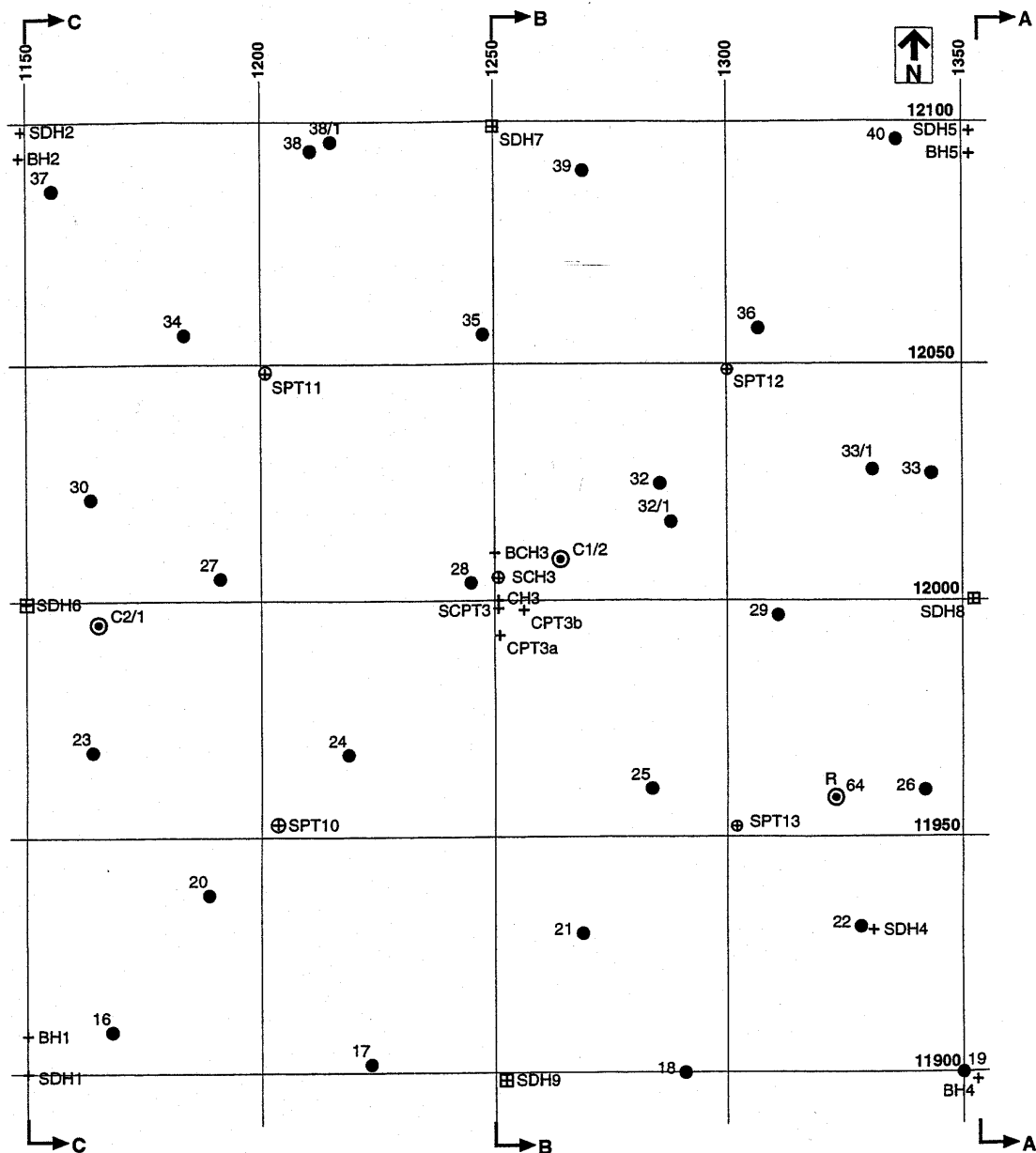
A fúrások elhelyezkedését és típusát a 19. ábrán láthatjuk. A vizsgált területen kijelölt öt mintavételi helyen két-két fúrást mélyítettek: egy folyamatos mintavételezett fúrást és egy, az SPT vizsgálatokhoz használt fúrást. A fúrásokat felhasználták a down-hole és cross-hole nyíróhullám sebesség mérésekhez is. Az SPT és a fentiekben említett CPT próbák korrelációját a vizsgálati helyek közelségével biztosították. Egy fúrás 100 m mély volt. A teljes geofizikai vizsgálati spektrumot elvégezték a kijelölt fúrólukokban, így a  $\gamma$ -hátér, a  $\gamma$ - $\gamma$  sűrűség, a porozitás, a potenciál és ellenállás, akusztikus, stb. vizsgálatokat is. A vizsgálatok kiterjedtek a talajvíz-szint és a permeabilitás mérésére is.

#### Laboratóriumi és in-situ tesztek:

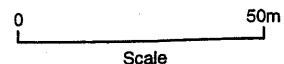
A már említett SPT, CPT, down-hole, cross-hole és szeizmikus tesztelésen kívül vizsgálták a szemcseméret-eloszlást, az Attenberg-határ, a sűrűség-eloszlást. A laboratóriumi tesztek ciklikus triaxiális, rezonáns-oszlop, permeabilitási vizsgálatokra terjedtek ki.

19. ábra: A geotechnikai vizsgálatok kiosztása a 15. ábra szerinti területen

ARUP

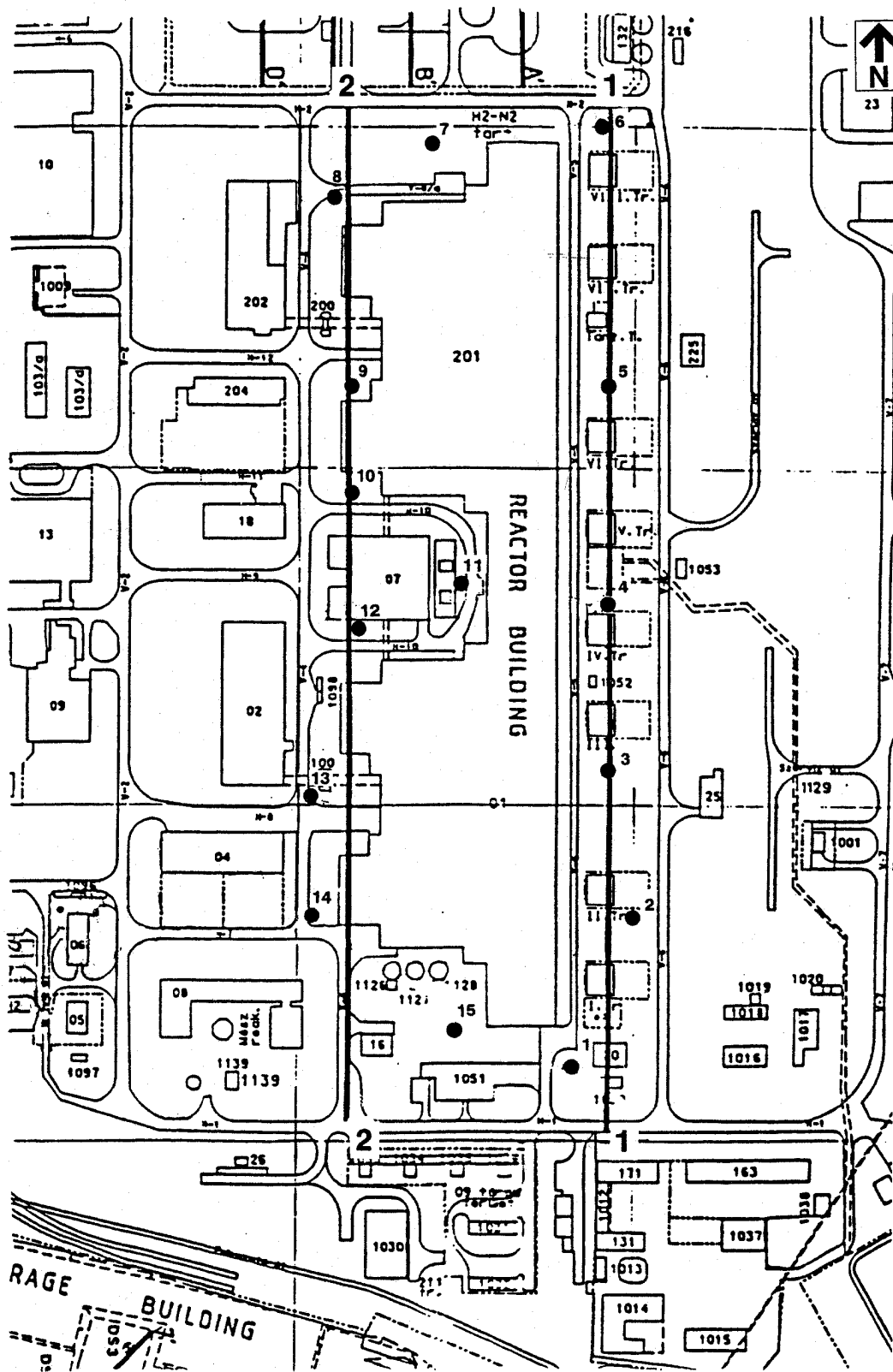


- + BH1-5            Continuously cored boreholes
- + SDH1,2,4,5    SPT boreholes with down hole seismic measurements
- + SDH6-9        SPT boreholes with seismic CPT
- ⊕ SPT10-13     SPT boreholes
- + BCH3          Continuously cored crosshole suite
- ⊕ SCH3         SPT borehole crosshole suite
- + CH3            Open hole crosshole suite
- Belgatom CPT investigation
- + SCPT3 seismic CPT
- + CPT3ab. CPT
- ⊙ Environmental Wells
- ↑ Section Lines



20. ábra: A CPT próbák helyei a főépület komplexum körül

ARUP



● Belgatom Cone Penetration Tests

Approximate Scale 1:3600

**A kapott eredmények bemutatása:**

A vizsgált terület hagyományos mérnökgeológiai jellemzésének ismétlésétől itt eltekintünk. Az előző fejezet megállapításait, mért jellemzőit az IMES és az OREX vizsgálatok a maguk eszköztárával lényegében megerősítették. Itt a talaj-épület kölcsönhatás számításához, a dinamikai elemzésekhez inputként szükséges geotechnikai paramétereket, illetve a talajfolyósodás értékeléséhez szükséges adatokat tekintjük át.

A dinamikai telephelyen geotechnikai szempontból három főbb jellemző réteget lehet azonosítani, ezek

1. típus: negyedkori folyóvízi / eolikus hordalék (beleértve a feltöltést is): sűrűsége  $1900 \text{ kg/m}^3$ ,
2. típus: negyedkori folyóvízi homok és kavics: sűrűsége  $2000 \text{ kg/m}^3$ ,
3. típus: negyedkori folyóvízi kavics: sűrűsége  $2100 \text{ kg/m}^3$ .

Ezek a rétegek takarják az  $500 \text{ m/s}$  feletti nyíróhullám sebességgel,  $2100 \text{ kg/m}^3$  sűrűséggel,  $525 \text{ Mpa}$  nyírási modulussal jellemezhető Pannon réteget.

**Az 1. táblázatban és a 21. ábrán a cross-hole nyíró- és P-hullám sebességének és a Poisson-tényezőnek mélységbeli eloszlását mutatjuk meg. Ebből, illetve a laboratóriumi mérésekből meghatározható a nyírási modulusz,  $G_0$  eloszlása, illetve ennek legjobb becslése. A nyírási modulus alakváltozás függő degradációját, amelyet normalizált görbeként minden rétegre lehet alkalmazni, a 22. ábrán láthatjuk, a 23. ábra pedig a csillapítás alakváltozás-függését mutatja.**

A 0 és 30 m mélységben az SPT eredményeket a 24. ábrán láthatjuk, a részecske-méret eloszlást pedig a 25. ábrán.

A teljes adathalmaz megtalálható az ISMES „Paks NPP Site Investigation and Site Response and Liquefaction Potential, Final Report, 1995. c. dokumentumban, továbbá a BELGATOM, „Geotechnical Report on the Cone Penetration Test: Seismic Reevaluation of the Paks NPP”, 1995. c. dokumentumban. Összefoglaló értékelés az OVE ARUP „Site Investigation for Site Response and Liquefaction Potential”, Interpretive Report, 1995. c. dokumentumban található [3].

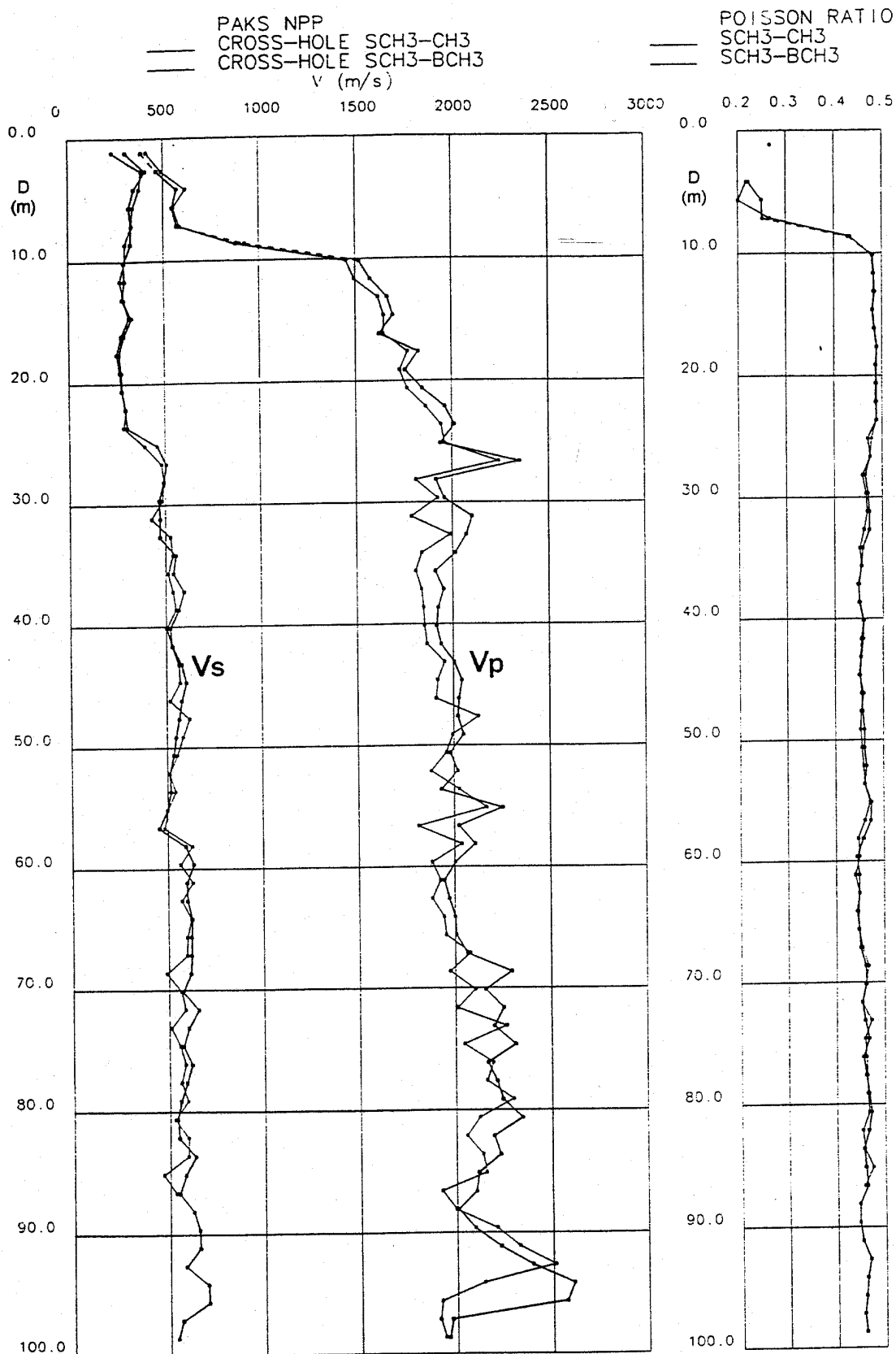
**1. táblázat: A telephely geotechnikai jellemzői**

szint, m	típus	$G_0$ , MPa	nyíróhullám sebesség, m/s	Poisson-szám
0	1	95.0	223.6	0.30
-1.50	1	114.5	245.5	0.30
-3.20	1	136.6	268.1	0.30
-5.00	1	160.0	290.2	0.30
-6.50	1	161.5	291.5	0.30
-8.00	2	163.0	285.5	0.30
-9.75	2	165.0	287.2	0.48
-11.50	2	167.0	289.0	0.48
-13.25	2	169.0	290.7	0.48
-15.00	3	171.0	285.4	0.48
-17.00	3	173.3	287.3	0.48
-19.00	3	175.6	289.2	0.48
-21.00	3	177.8	291.0	0.48
-23.00	3	180.0	292.8	0.48
-24.50	3	266.0	355.9	0.48



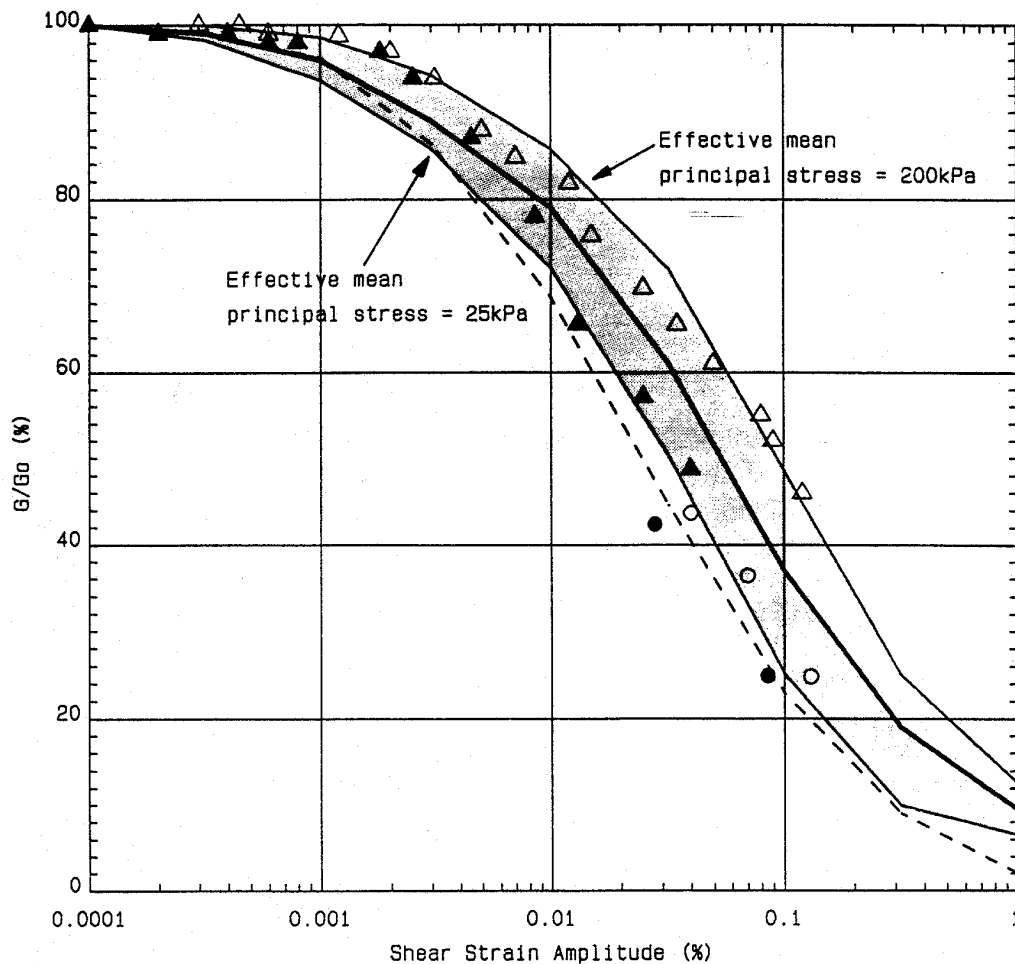
21. ábra: A cross-hole nyíró- és P-hullám sebességének és a Poisson-tényezőnek mélységbeli eloszlása

ARUP



22. ábra: A nyírási modulus alakváltozás függő degradációja alakváltozás függvénye

ARUP

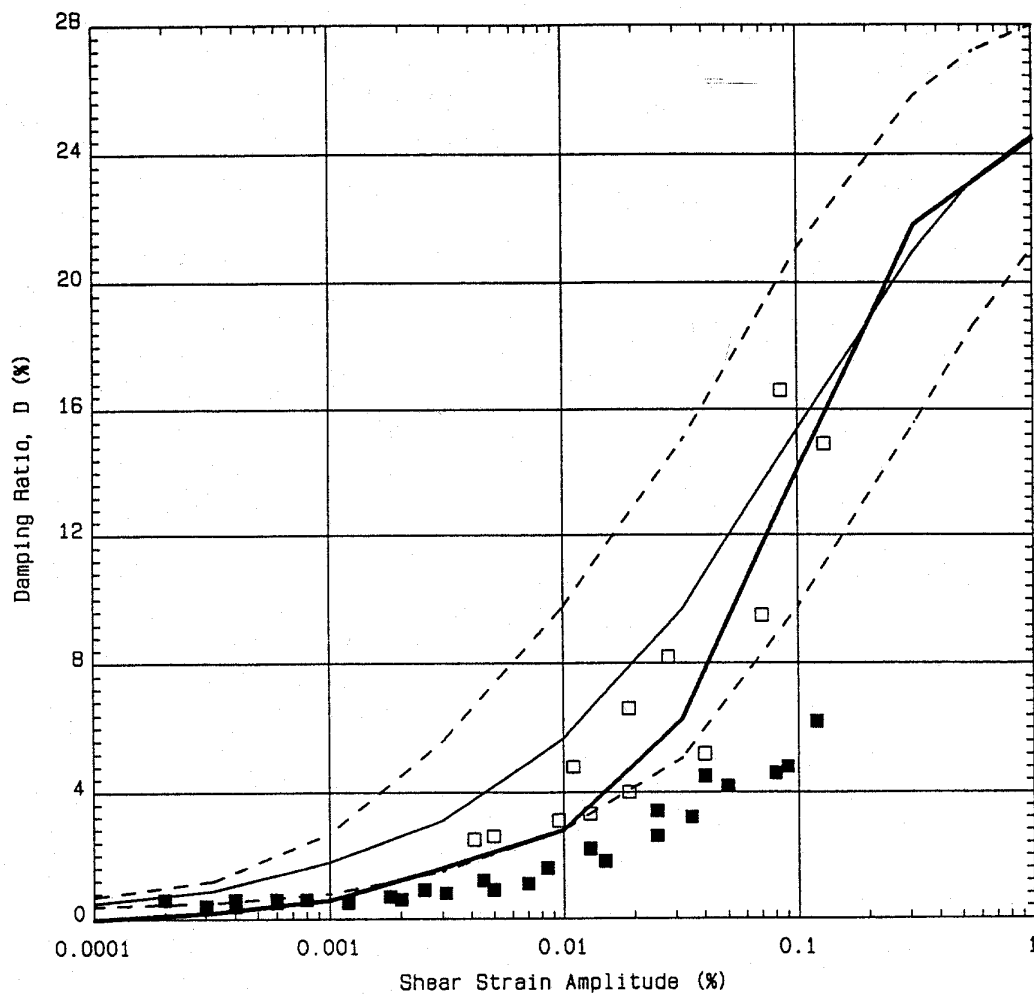


**LEGEND**

- Iwasaki et al., 1976
- Best Estimate Curve
- Vucetic & Dobry, 1991: PI = 0
- Resonant Column Test Results
- △ BH4 at 11.79m Cell Pressure 300kPa
- ▲ BH3 at 11.0m Cell Pressure 185kPa
- Cyclic Triaxial Test Results
- BH4 at 11.79m Cell Pressure 300kPa
- BH4 at 11.79m Cell Pressure 100kPa

23. ábra: A csillapítás alakváltozás függvénye

ARUP



LEGEND

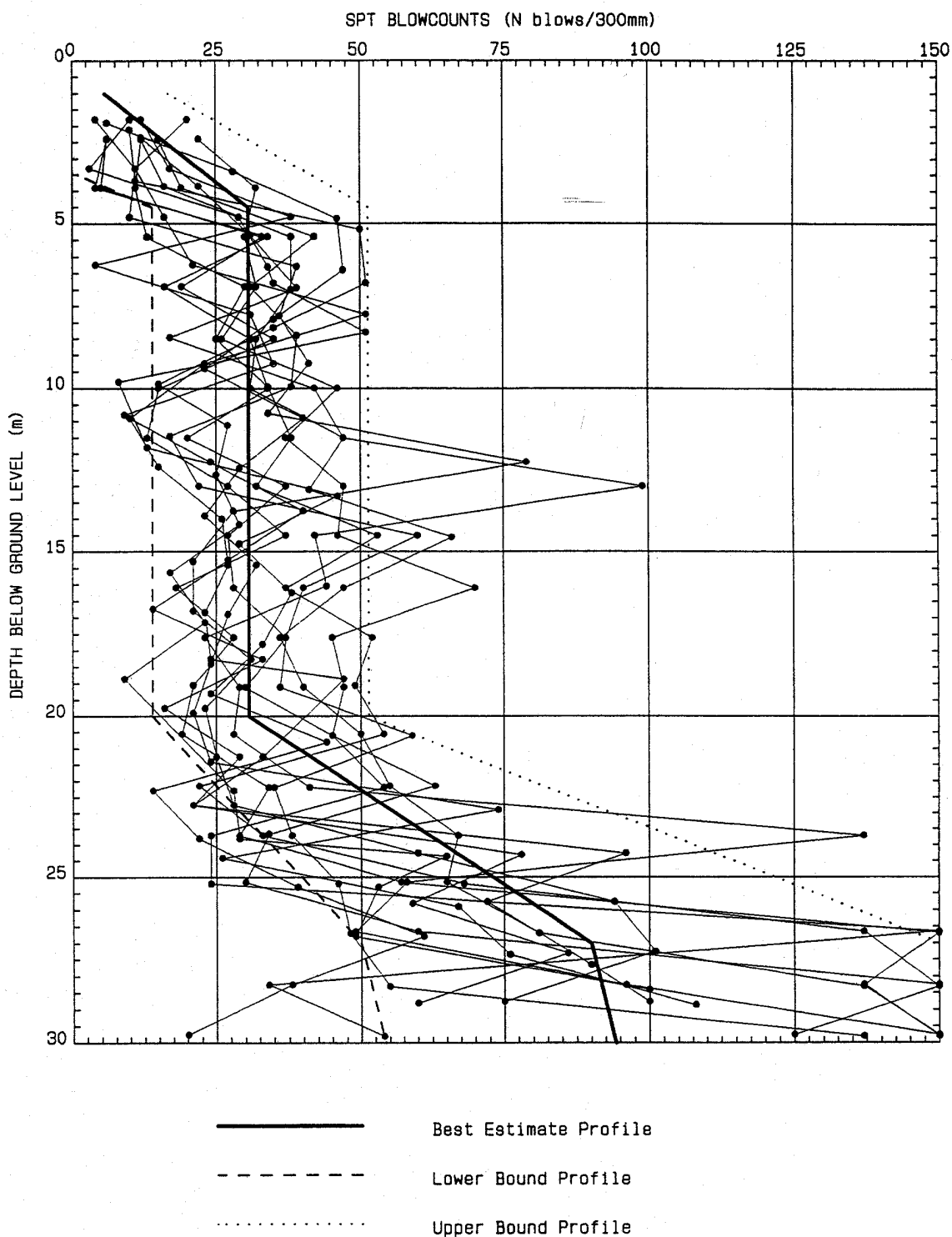
□ Cyclic Triaxial Test Results

— Best Estimate Curve

■ Resonant Column Test Results

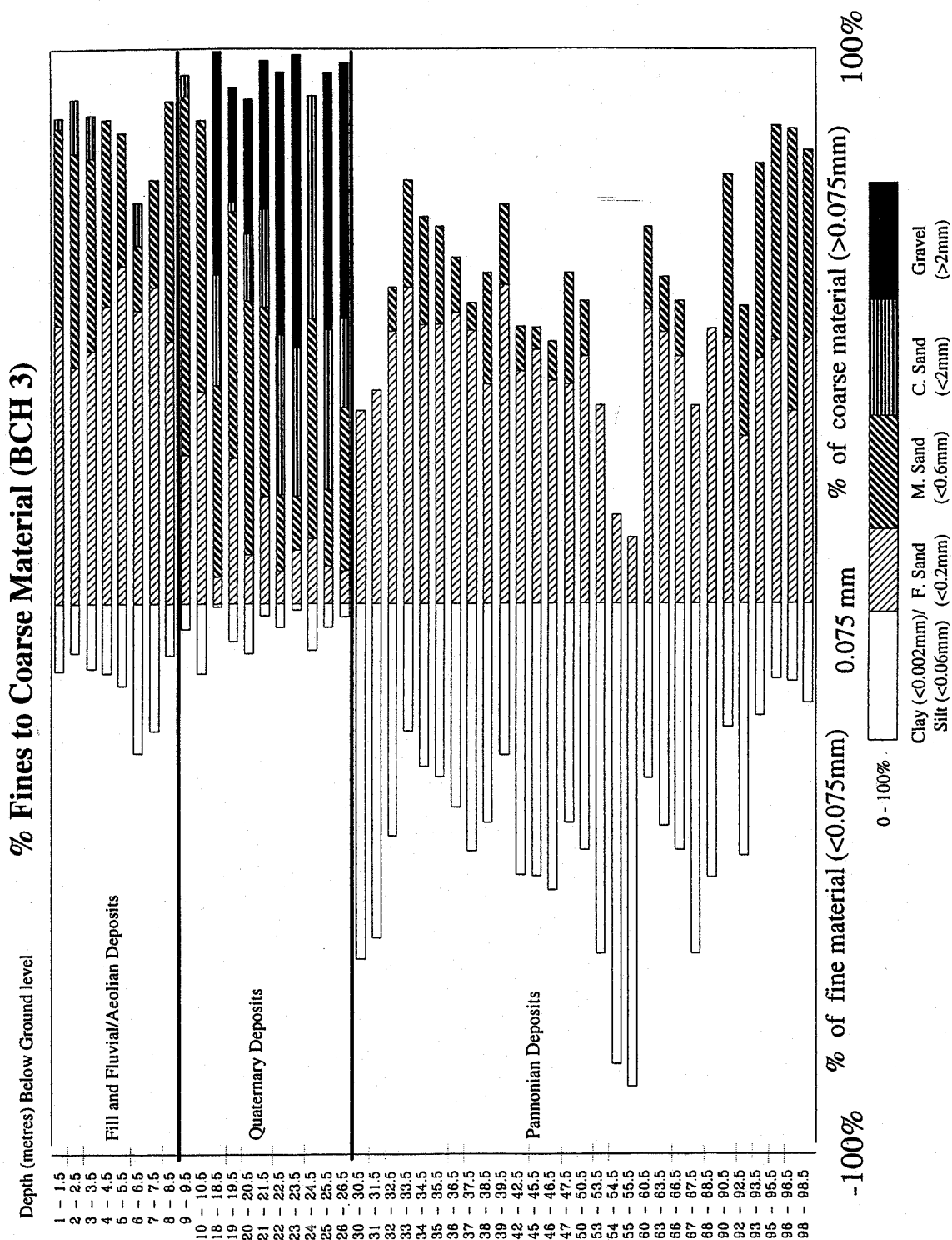
24. ábra: SPT eredmények 0 és 30 m mélységben

ARUP



25. ábra: Részecske-méret eloszlás

ARUP



## A talajfolyósodás lehetőségének és a talaj stabilitásának vizsgálata

Az SPT adatok, de különösen a szemcseméret eloszlás arra intenek, hogy telephelyet borító finom üledék talajfolyósodásra hajlamos. Ezt a 26. ábra demonstrálja.

Tekintettel arra, hogy a talajfolyósodás utólagos kiküszöbölése nehezen képzelhető el, ezért a leginkább korszerűnek tekinthető eljárással részletesen meg kellett vizsgálni a problémát. A választott eljárás a talajfolyósodás lehetőségének valószínűségi értékelését adja a talajfolyósodás visszatérési idejének (return period), illetve éves gyakoriságának meghatározásával.

A talajfolyósodás értékelésének alapja az átlagos nyírófeszültség és az effektív nyomás arányára (effektív ciklikus nyírófeszültség viszony) és a korrigált SPT ütészámra vonatkozó, a szemcse-eloszlás szerint parametrizált közismert Seed-féle empirikus összefüggés, (lásd a 27. ábrát, illetve a 28. ábrát). Az empirikus összefüggés alkalmazásánál a magnitúdó szerint korrekciót kell alkalmazni. A ciklikus nyírófeszültség számítása az OVE ARUP Oasys SIREN programmal, a talajfolyósodás kialakulása éves valószínűségének számítása pedig az Oasys LIQEFY programmal történt. A nyíró és normálfeszültség talajfolyósodás szempontjából kritikus arányának eloszlását a 29. ábrán láthatjuk. Megállapítható, hogy a 10-20 m mélység közötti réteg hajlamos csak folyósodásra. A 10 m mélyen lévő rétegre 11.900 éves, a 12.5 m-en lévőre 11.300 éves, a 15 m-en lévőre pedig 11.700 éves best estimate talajfolyósodási visszatérési periódus jellemző. A részletes érzékenységi vizsgálatok szerint, pl. a 15%, illetve 85% konfidencia szinten vett periódus 8.000 és 33.000 év.

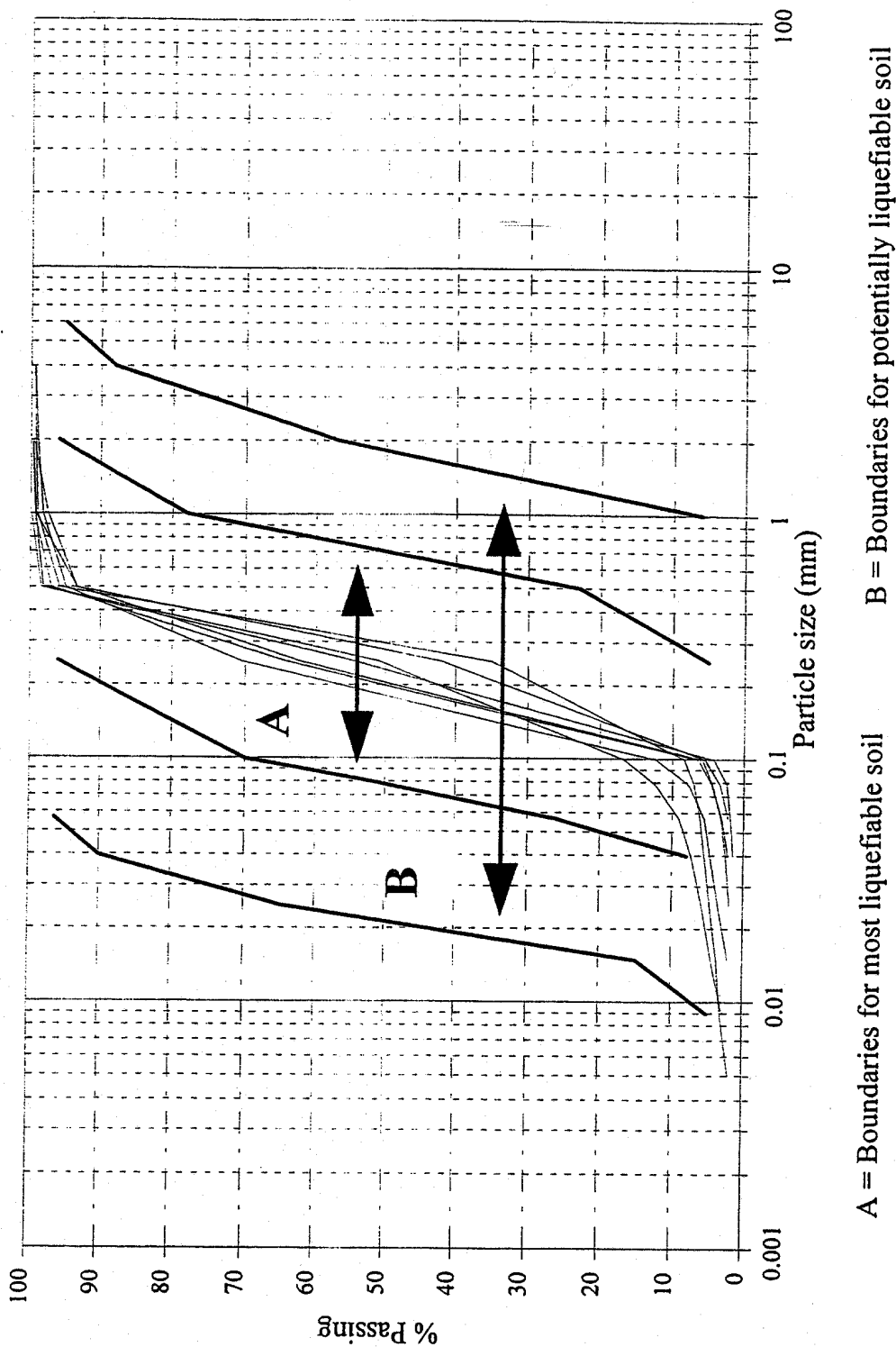
A főépület 130 kPa talpnyomása módosítja a talajfolyósodási potenciált. Ez a talaj-épület kölcsönhatás számítására szolgáló FLUSH program segítségével értékelhető. Érdeemes megjegyezni, hogy a FLUSH a szabadfelszíni input mozgás (0,25 g) dekonvolúciójával az alapozási mélységre 0,2 g maximális vízszintes gyorsulást ad. A 10000 éves visszatérési idejű rengésre a talaj-épület kölcsönhatás által módosított ciklikus nyírófeszültség viszony számítására itt is az Oasys LIQEFY program szolgált. A -10 és -20 m közötti rétegekben a best estimate talajfolyósodási visszatérési periódus 14.800 év -15 m-en, az alaplemezhez legközelebbi -10 m-es rétegben pedig 18.300 év. A reaktor főépület alatt a talajfolyósodás éves gyakoriságára kapott eredményt a 30. ábrán láthatjuk.

A legújabb eredmények szerint sekély alapozás sérülésével nem kell számolni, ha a megfolyó réteg felett megfelelő vastagságú stabil fedőréteg van. Megállapítható, hogy a főépület alatt globális talajfolyósodással -  $10^{-4}$  éves valószínűséget véve - nem kell számítani. A legjobb becslés ennél szignifikánsan kisebb valószínűséget ad, a  $10^{-4}$  érték jó 85 %-os konfidenciaszintű becslésnek felel meg. Ugyanakkor a szabad területre legjobb becslésként kapott talajfolyósodási éves valószínűség alulról közelítve, de igen közel van a  $10^{-4}$  éves értékhez, míg a 85%-os konfidenciai szintű becslés kb.  $2 \cdot 10^{-4}$  éves valószínűséget ad. Ebből következik, hogy az egyéb, földrengésbiztonsági szempontból első kategóriás épület esetében a talaj-épület kölcsönhatás figyelembevételével lehet konkrét ítéletet alkotni.

A földrengésnek kitett főépület alapozás stabilitásának, a talaj teherviselő képességének, a megcsúszással szembeni biztonságnak, valamint a földrengés okozta süllyedésnek vizsgálata a korszerű előírások figyelembevételével (BS,8004, Draft Eurocode és Eurocode 8 Part 5 (1995)) a kialakult talajfolyósodás esetére, továbbá a 10000 éves mértékadó rengés esetére készültek.

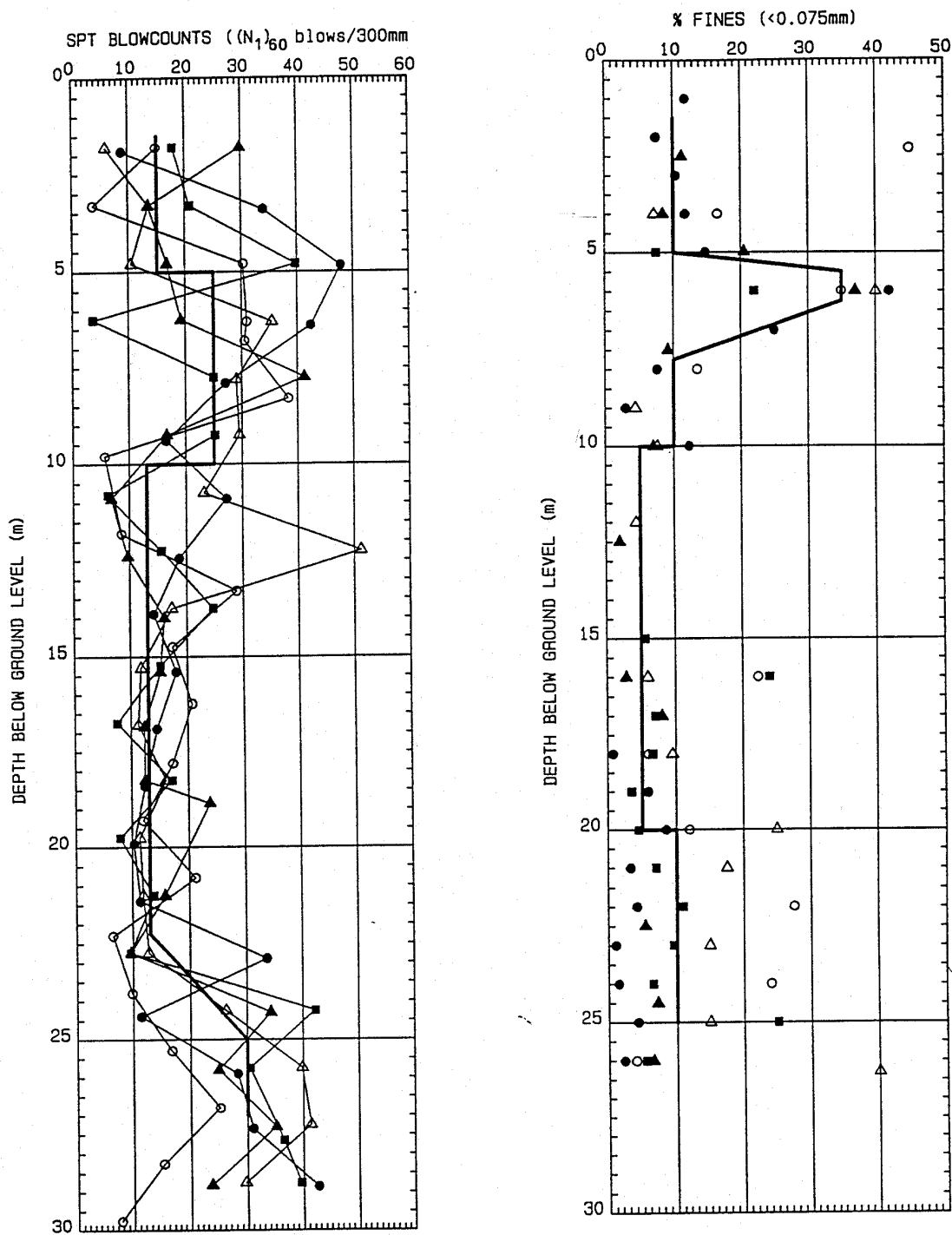
26. ábra: A szemcseméret eloszlás és a talajfolyósodási hajlam

ARUP



27. ábra: A korrigált SPT ütésszám és a szemcse eloszlás

ARUP



LEGEND

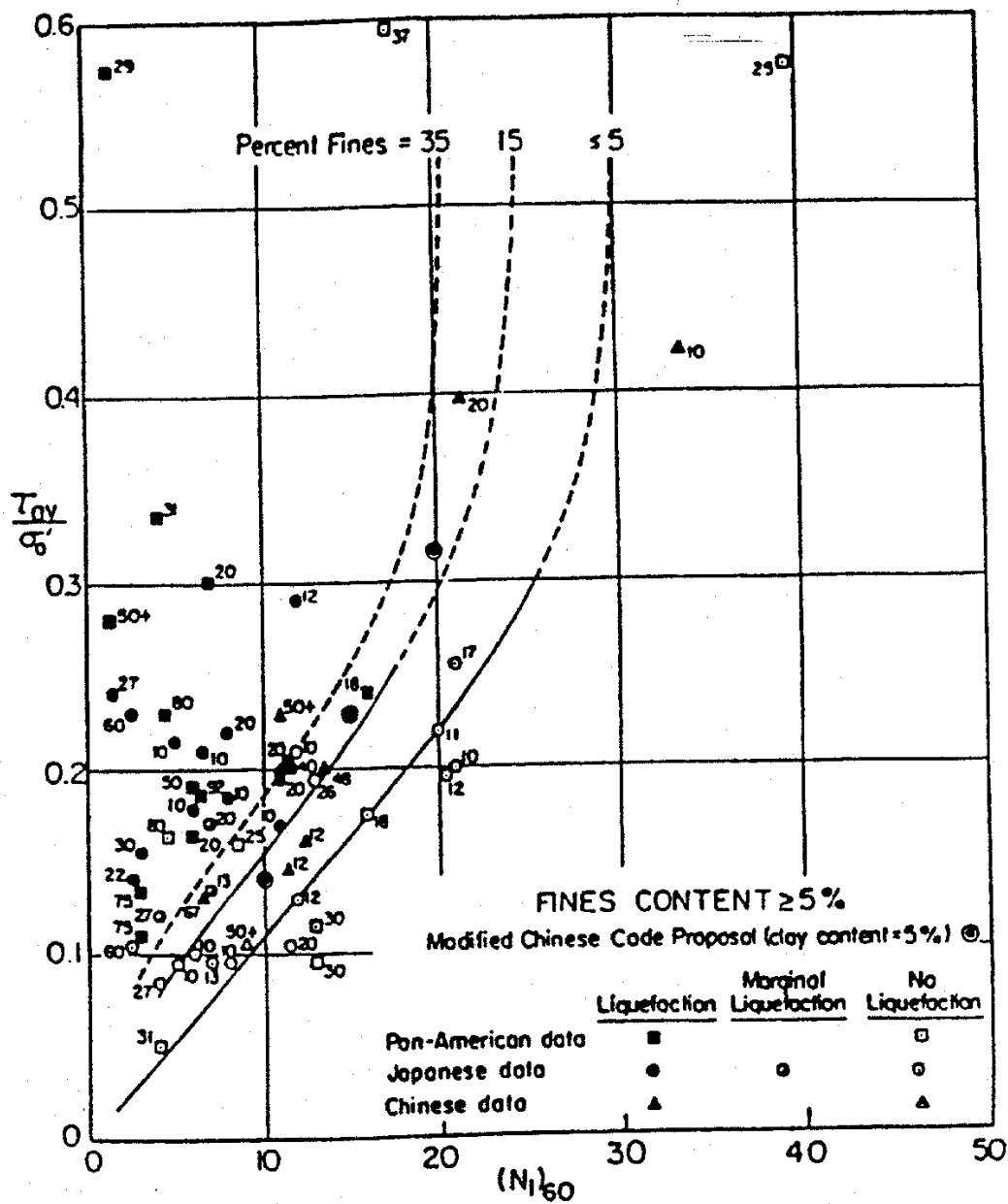
- ▲ Boreholes SDH1 and BH1
- △ Boreholes SDH2 and BH2
- Boreholes SCH3 and BH3
- Boreholes SDH4 and BH4
- Boreholes SDH5 and BH5

— Design Lines



28. ábra: A Seed-féle empirikus összefüggés

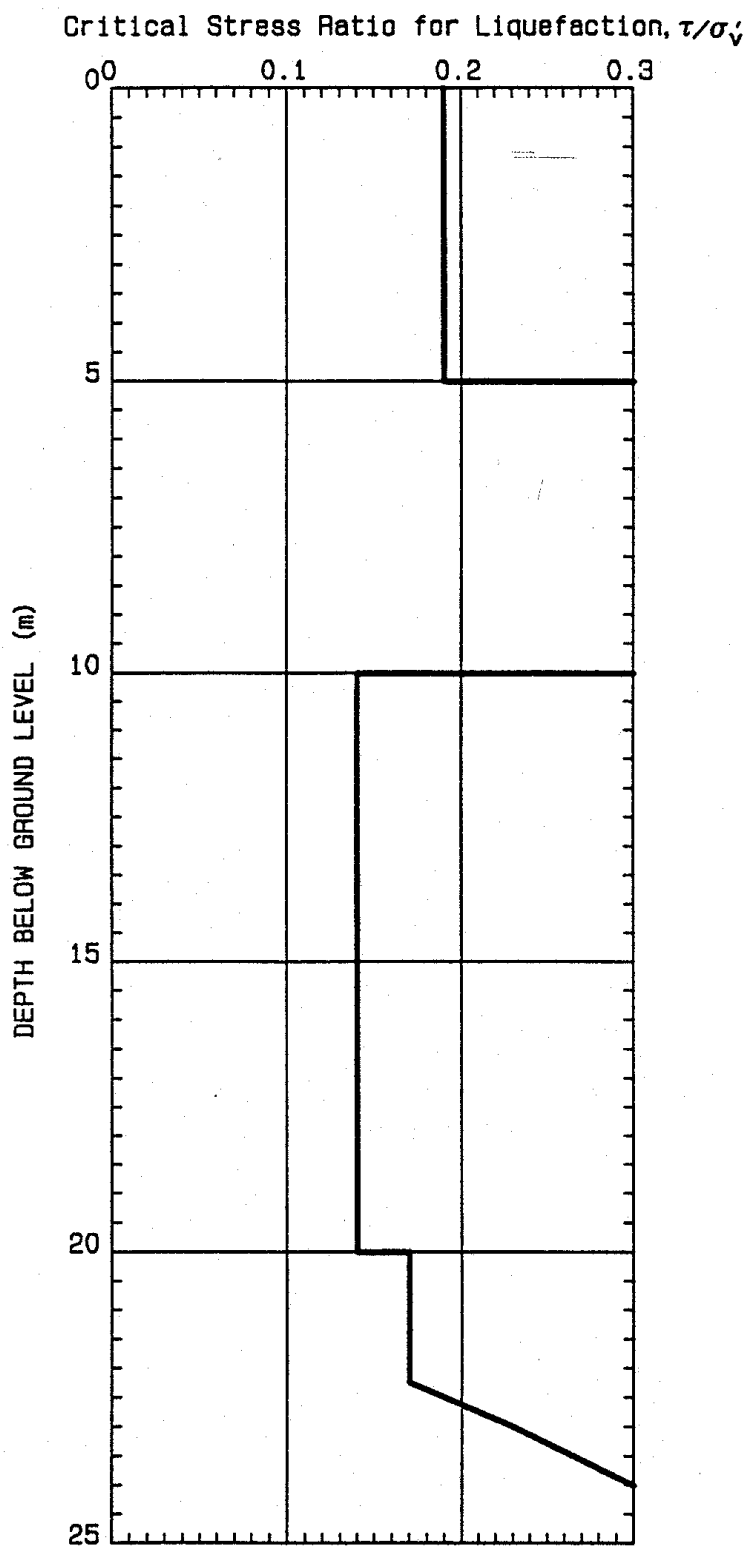
ARUP



Note: This figure is normalised for a magnitude 7.5 earthquake

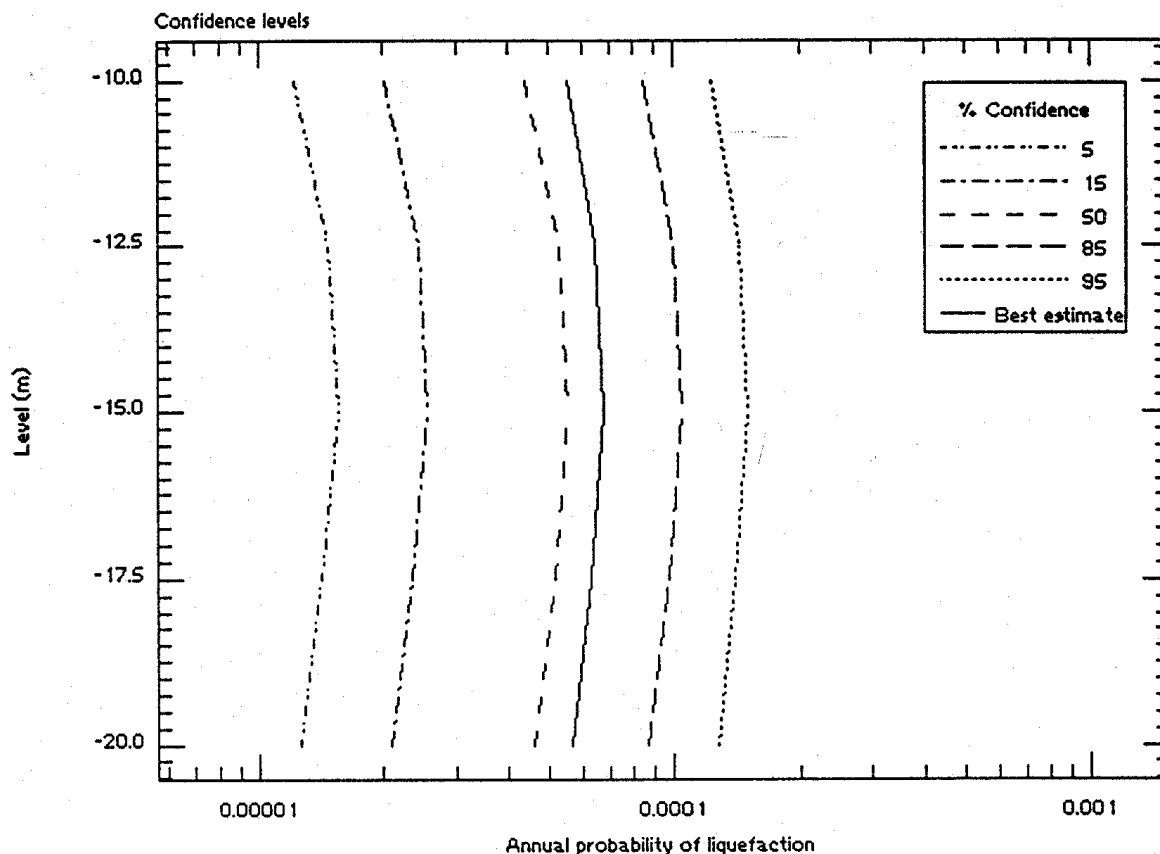
29. ábra: A nyíró és normál feszültség talajfolyósodás szempontjából kritikus arányának eloszlása

ARUP



## 30. ábra: A reaktor főépület alatt a talajfolyósodás éves gyakoriságára kapott eredmény

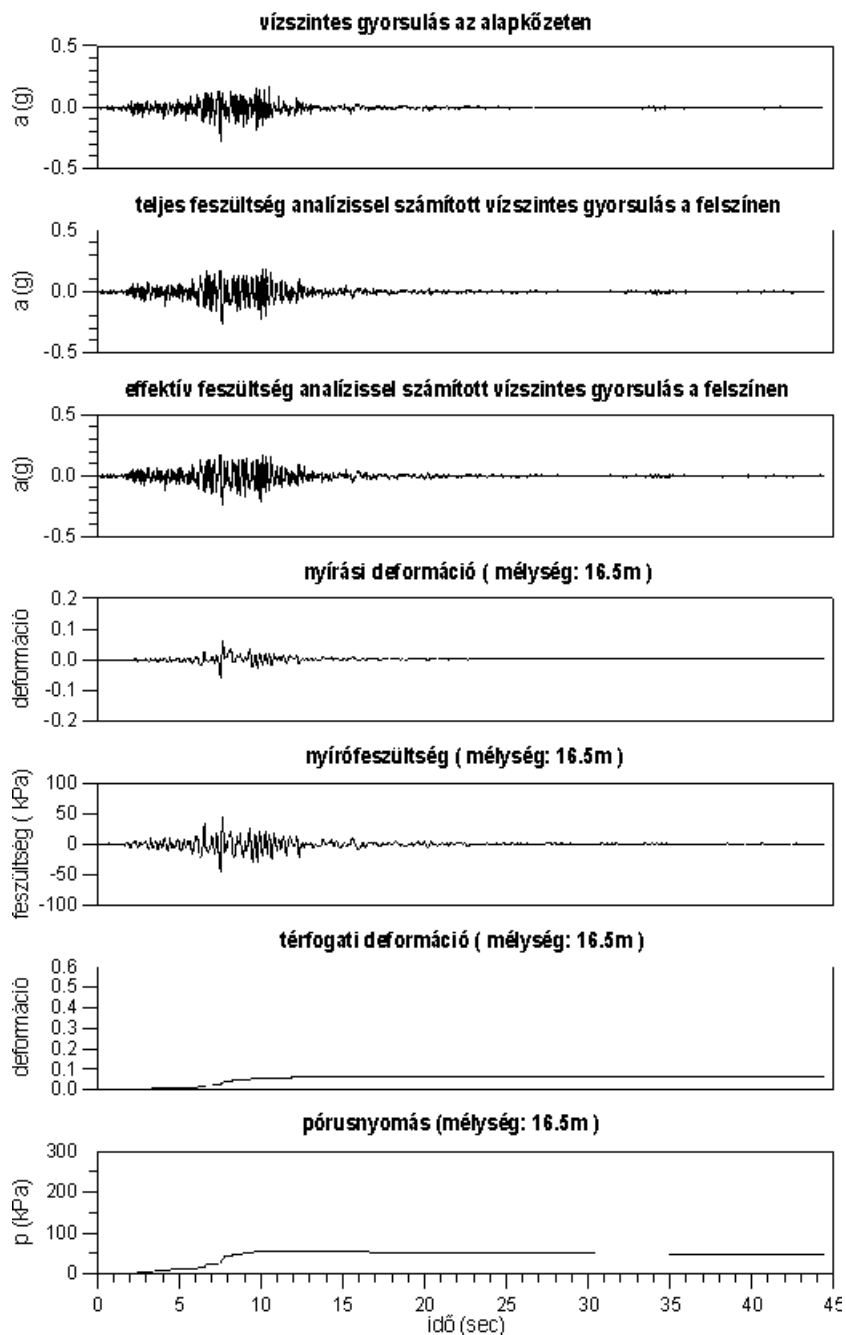
ARUP



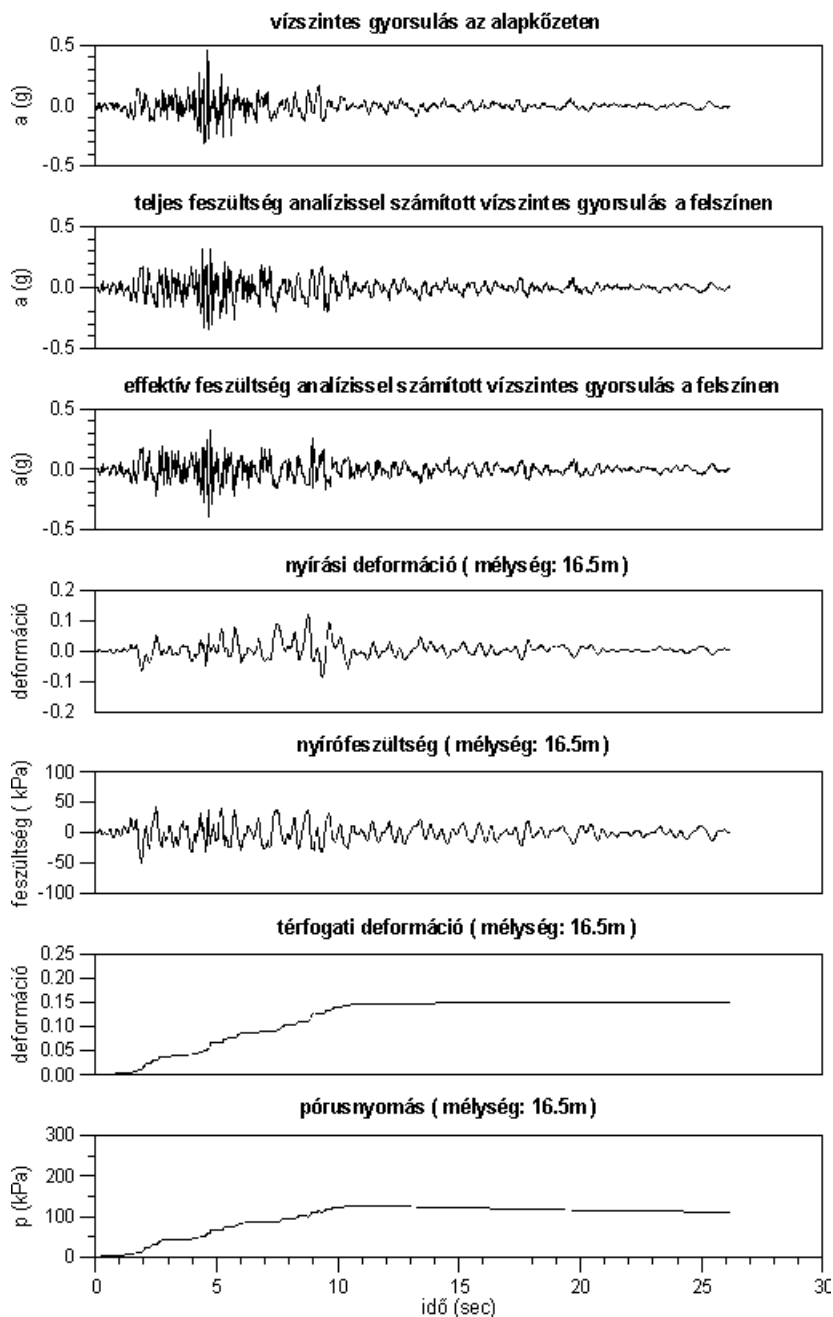
A reaktor főépület alaplemeze közvetlenül a megfolyásra hajlamos réteg felett van ezért ennek megfolyt állapotbeli teherviselő képességét ellenőrizni kellett. Megállapítható, hogy 130 kPa talpnyomás esetén a kritikus teherviselő képesség elegendően nagy az alapozás stabilitása szempontjából. Nem kell számolni a főépület megcsúszásával sem. Amennyiben az alaplemez alatti 3 m vastag talajréteg egy extrém földrengés hatásaként megfolyósodna az épület globális süllyedése 60 mm lenne. A 10 000 éves visszatérési periódusú földrengésnél 12 mm épületsüllyedés várható.

A tervezési alapot meghaladó vizsgálatok a telephely alatti talaj folyósodási hajlamát igen részletesen feltárták [5]. A 31. – 32. ábrákon látható a földrengés okozta alakváltozás és pórusnyomás, illetve a feszültség-eloszlás a talajban. A 33. – 35. ábrákon látható, hogy a 10 000 éves rengések esetében jelentős tartalék van a talajfolyósodásig, míg a 100 000 és 1 000 000 éves visszatérési idejű rengések talajfolyósodáshoz vezetnek. A 36. ábrán közölt válaszspektrumokból látható, hogy a talajfolyósodás drasztikusan megváltoztatja a szabadfelszíni talajmozgás jellegét.

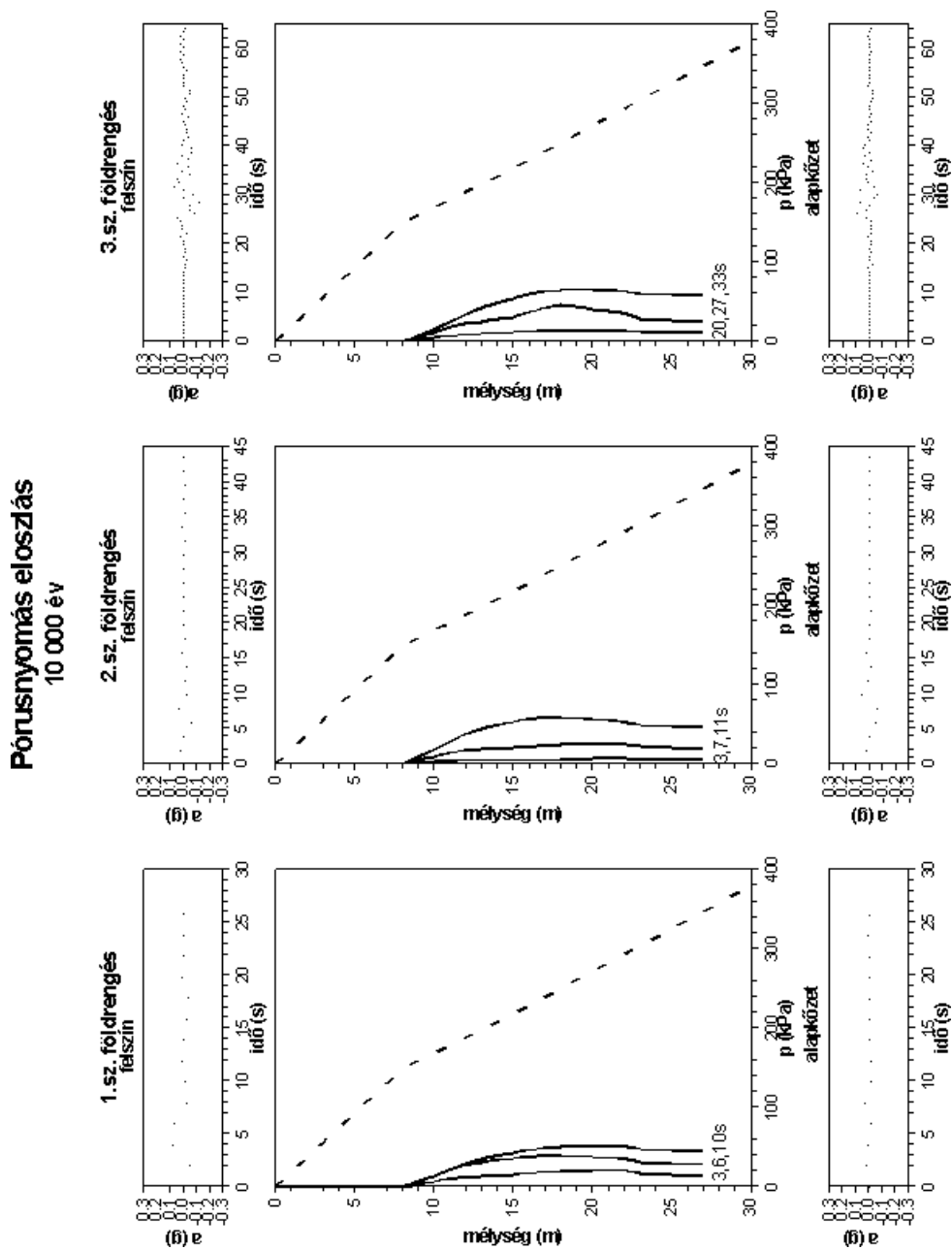
**31. ábra: A 10 000 éves földrengés okozta feszültségmező a talajban**  
**10 000 év**  
**( 2.sz. földrengés )**



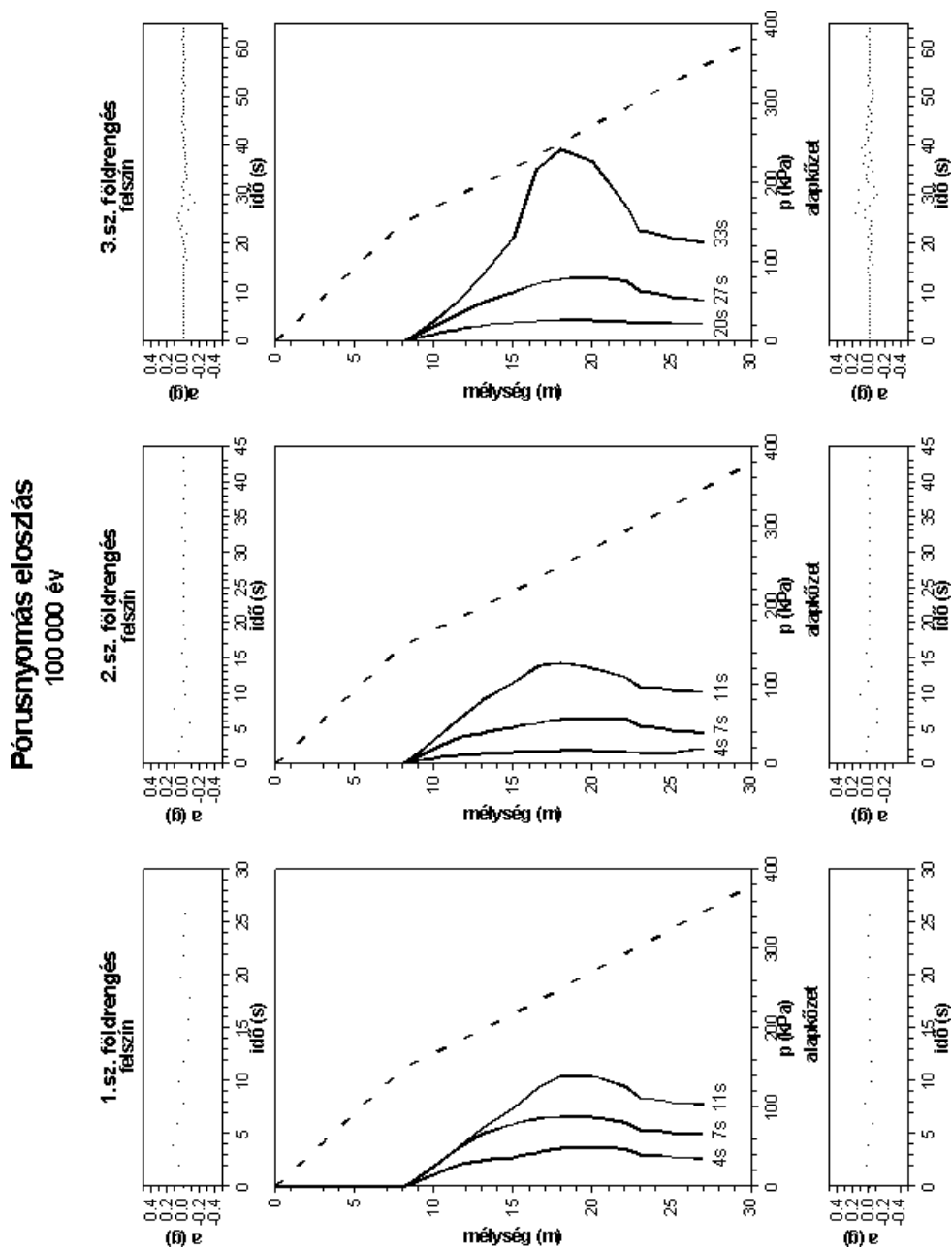
**32. ábra: A 100 000 éves földrengés okozta feszültségmező a talajban**  
**100 000 év**  
**( 1.sz földrengés )**



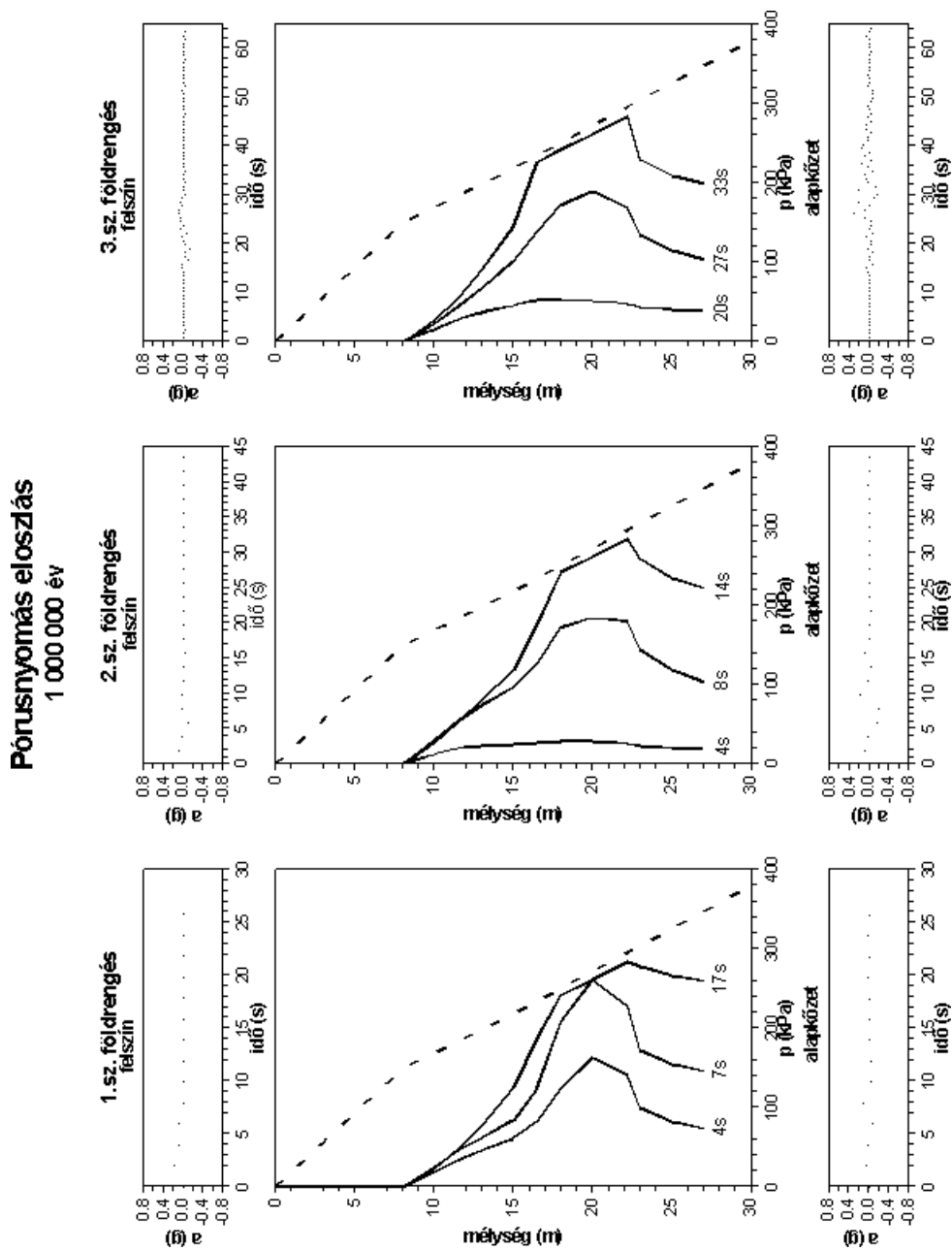
33. ábra: A talajfolyósodás kialakulásának feltételei a 10 000 éves szinten



34. ábra: A talajfolyósodás kialakulásának feltételei a 100 000 éves szinten

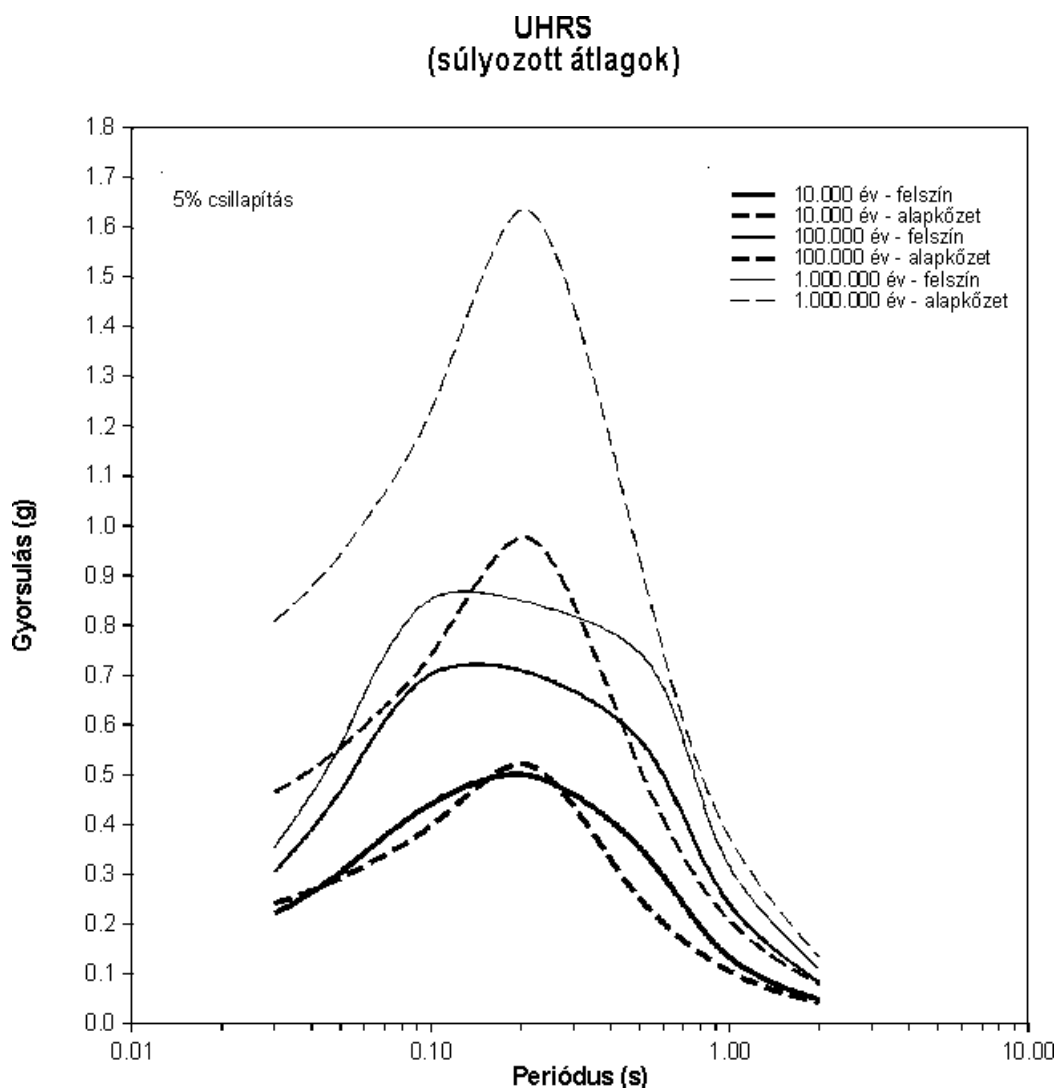


35. ábra: A talajfolyósodás kialakulásának feltételei az 1 000 000 éves szinten





**36. ábra: A szabadfelszíni válaszspektrum a  $10^{-4}$ , a  $10^{-5}$  és a  $10^{-6}$  /éves gyakorisági szinteken**



## 6. Hidrogeológiai képződmények

Több fázisban részletes hidrológiai kiértékelés készült a területre és tágabb környezetére. A hidrológiai észlelőhálózat kiépítése 1967-ben kezdődött talajmechanikai fúrások kúttá történő kialakításával. A jelen mértékű észlelőhálózat kialakítása 1982-ben indult. A monitoring hálózat legújabb elemei az 1999-ben indított „Környezetvédelmi-, telephely- és vízjogi engedélyezési kérdésekhez kapcsolódó telephely-jellemzési program keretében létesültek.

A térségben kétféle felszín alatti víz fordul elő: rétegvíz a pannon homokszintekben, amely mélyen a vízzáró rétegek alatt helyezkedik el, s efölött, a pleisztocén-holocén összletben lévő, összefüggő talajvíz.

A talajvízig települő összlet a homokbányákból származó saját anyagból készült feltöltés, amely alatt a Duna áradásából származó újholocén öntésagyag, öntéshomok, öntésiszap települ. A Duna medrétől távolodva óholocén futóhomok összlet borítja az eredeti térszint. Ez alatt kőzetliszt, finomhomok szemcsenagyságú folyami üledékes összlet következik. A fenti rétegeken keresztül függőlegesen szivároghat el a csapadék a talajvízig.

## 6.1. A hidrogeológiai viszonyok leírása

A térségben kialakuló talajvízáramlási viszonyok csak a regionális rendszerbe beillesztve értelmezhetők.

A térség erózióbázisát a Duna képezi. A Duna vízjárása határozza meg az áramlási viszonyokat.

A Dunát szegélyező sávban az alábbi önálló egységek különíthetők el:

A Dunát szegélyező alacsony árteret a Duna üledékei építik fel, öntéshomok és ártéri iszap. Feltöltött hajdani meanderek hálózák be. Jelenleg az árvízi elöntéstől a 96-97 mBf-re kiépített árvédelmi gátak megvédik, de a Duna vízállásváltozásai – elsősorban a lefűződött egykori meder anyagán keresztül – élénken befolyásolják a talajvízszint alakulását. A 37. és a 38. ábrák mutatják a talajvízszint összefüggését a Duna alacsony ill. magas vízállásával.

A Duna allúviuma fölé emelkedik mintegy 6 - 8 m-rel a Duna újpleisztocén terasza. Anyaga murvás aprókavicsos rétegekkel tagolt folyóvízi homok. Felszínét futóhomok lepel borítja. A terasz talajvízállás viszonyait a Duna már alig befolyásolja.

A Duna-völgyét ÉNy felől 160 - 180 mBf magasságig emelkedő löszplató szegélyezi. A löszplató felszínére hulló és beszivárgó csapadékvíz a vályogzónák felett összegyülekezve a porózusabb szintekben az erózióbázis fele vezetődik. Ez a Duna-völgyi talajvíz tápterülete.

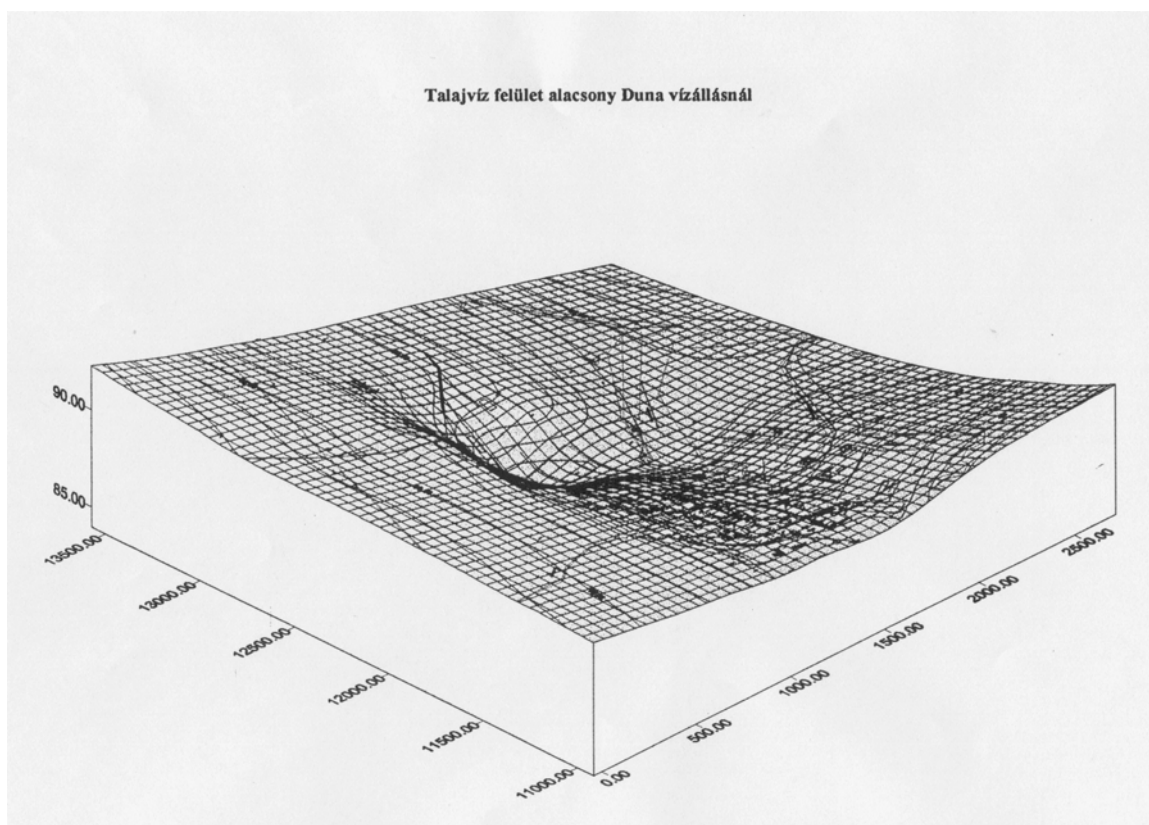
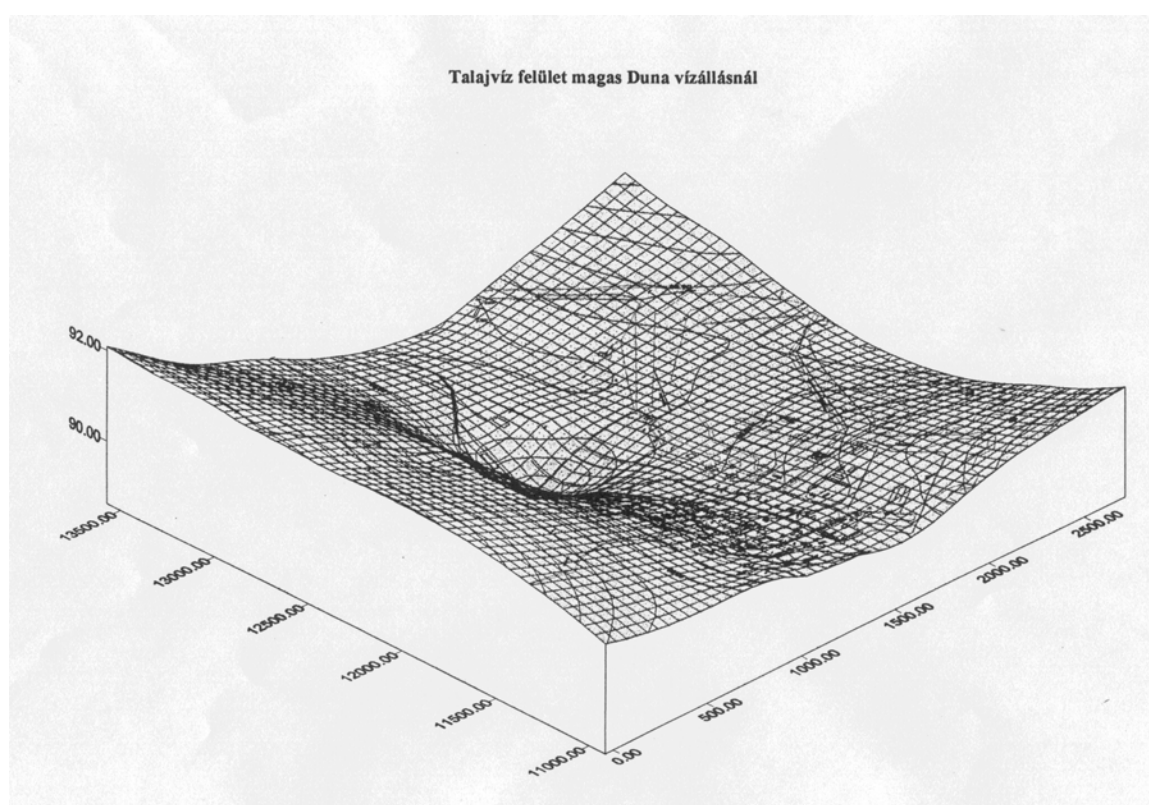
A talajvíztároló összlet fekvését a pannon tavi üledékek képezik. Az atomerőmű lényegében a futóhomokkal borított folyóvízi terasz szinten létesült.

### A talajvíz és a felszíni víz egymásra gyakorolt hatása

A völgyekben a kevésbé átteresztő alapkőzetet általában átteresztő, alluviális üledék takarja, így a folyót szegélyező síkság talajvizének vízjárását a felszíni víz döntően befolyásolja. A völgytalp külső szegélyén a talajvíz kapcsolatban van a környező magasabb területeket felépítő rétegekkel. Ahol ezek a rétegek nem teljesen vízzáróak, ott a folyó menti síkság talajvizének vízháztartására a környező területek talajvize is hatással van.

Abban az esetben, ha a folyó vízszintjének változása jelentős, a talajvízáramlás iránya a parti sávban időről-időre változik. Árvizek idején a vízszint a mederben magasabb, mint a környezetben kialakult talajvíztükör. Ilyenkor a folyó táplálja a talajvizet azon a zónán belül, ameddig a folyó visszaduzzasztó hatása előre tud haladni az árvízi időszakban (= a folyó közvetlen hatásának sávja).

Ugyanebben az időszakban a folyó magas vízállása a kívülről érkező talajvízáramlást is megállítja. Az érkező vízmennyiség tehát a folyó menti síkságon tározódik, emelve ott a talajvíz felszínét, s ezzel itt az átlag fölé emeli a párolgást is, ami az érkező víz egy részét mindjárt le is csapolja (= a folyó által közvetve befolyásolt sáv). Amikor ismét kisvíz alakul ki a folyón, annak szintje alacsonyabb lesz, mint a folyó menti átlagos talajvíztükör. Ez a folyamat először leüríti azt a vízmennyiséget, amely az árvíz alatt a parti rétegek pórusaiban tározódott. Ezt követően a leszívás túljut a közvetlenül befolyásolt zóna határán, és nagyobb távolságban is süllyeszti a talajvíz tükörét. Végül újra kialakul az egyensúlyi állapot, amikor is a folyó menti síkságra kívülről érkező vízhozam egyensúlyba jut az ott elpárolgó és a folyóba szivárgó mennyiséggel.

**37. ábra: Talajvíz felület alacsony Duna vízállásnál****38. ábra: Talajvíz felület magas Duna vízállásnál**

E nagyon bonyolult folyamat számszerű jellemző adatait a helyi adottságok döntően befolyásolják. Nagyon nehéz ezért olyan eljárást javasolni, amellyel a folyó által közvetlenül vagy közvetve befolyásolt zóna számítható lenne. Legáltalánosabban a folyó menti megfigyelőkutak észlelése alapján megszerkesztett vízállásgörbék elemzésének segítségével becsülhetők ezek a távolságok, illetve áramlási modell együttes alkalmazásával határozhatók meg.

A Duna és a talajvízszint közötti összefüggés számszerűsítésére vízálláskapcsolati görbe került megszerkesztésre a Duna árhullámainak amplitúdója és a figyelőkutakban mért relatív vízszintemelkedés között. Mivel a Dunai árhullámok változó hidrológiai körülmények között jönnek létre, kisvízre és telt mederre ráfutó árhullámról egyaránt szó lehet, a mérési adatok elég nagy szórást mutatnak az adatok alapján számított regressziós egyenes körül. A számítás alapján azonban néhány törvényszerűség megállapítható. A Dunától távolodva a linearitást mérő korrelációs együttható abszolút értéke csökken. Az összefüggés szorossága lazul, majd az összefüggés megszűnik. A függvény meredeksége is szabályszerűen változik. A Duna közelében az iránytangens 0,7 körüli, azaz egy 10 m-es árhullámnak 7 m vízszintváltozás felelne meg a partszegélyi sávban.

A hidegvízcsatorna mentén a parttól 200-500 m-es sávban az árhullám nagysága harmadrésére csökken ( $m \approx 0,3$ ). Ennél nagyobb távolságra a hatás gyakorlatilag alig mutatható ki. Példaként megemlítendő, hogy egy KÖV-re ráfutó kb. 5 m-es árhullám a parttól 250-500 m-re 2-4 napos késéssel mérhető.

A korrelációs egyenesek paraméterei segítségével tetszőleges árvízhez tartozó talajvízszint-emelkedés mértéke az adott észlelőkút térségében becsülhető. Az észlelési időtartam növekedésével a számításba bevont árhullámok számának szaporodásával a korrelációs együttható értékének kismértékű javulása várható.

Az árvízi tetőzések tovaterjedési sebessége ( $\approx v = 100$  m/d) arra enged következtetni, hogy ez a legelső kavicsos szintben zajlik le nyomáshullám továbbterjedéseként. A rendszer nyomásalatti rendszerként működik. A vízvezetési folyamatok a legjobb szivárgási tényezőjű kavicsos szintjében zajlanak. A felső 15-20 m-es kőzetlisztes, finomhomokos, homokos szint vízrekesztő réteggé funkcionál, a felszínről beszivárgó csapadékvíz azonban az összefüggő talajvízszintig levezeti.

A fentiek ismeretében az erőmű területére vonatkoztatva a következő hidrológiai, geohidrológiai megállapítások tehetők:

- A talajvízszint fölötti háromfázisú rendszer vízáteresztő képessége gyenge, a vízáramlás függőleges irányban lassú, esetleges szennyeződés esetén elegendő idő áll rendelkezésre a talajvizig történő lejutás megakadályozására.
- A talajvíz összefüggő szintje alatti kétfázisú rendszerben az áramlás sebessége rétegenként nagyságrendekkel változik. A függőleges irányú áramlás sebessége mintegy 2/3-a vízszintes irányú áramlásnak.
- A pannon üledékösszlet rétegvize önálló rendszert képez, nem utánpótlódik a folyóvízi üledék vízkészletéből, vízátadás csak a rétegvíz felől a talajvíz felé lehetséges.
- A radioaktív izotópos víz-kormeghatározás alapján a folyóvízi üledék - a Dunával való kapcsolat miatt - friss víz a Dunától való távolságtól függő mértékű trícium tartalmú. A pannon rétegvíz idős, tríciumot nem tartalmaz.
- A pontszerű szennyeződésforrás hatására az áramló talajvízben kialakuló szennyeződés csóva közelítőleg 60°-os szögnek megfelelően szétnyílván terjed.

- A főépület közvetlen környezetében a potenciális szennyeződés helyétől mért távolsággal közelítőleg egyenlően kiosztva a kútsor alkalmas a szennyeződés észlelésére.
- A szennyeződés egyes szélsőséges hidrológiai körülmények között lejut az alsó kavicsos szintig, ahol az áramlás sebessége egy nagyságrenddel nagyobb mint a felső homokos szintben.
- Az észleléseknek – az erőmű egész területén – a második észlelési zónában ki kell terjednie a 18-22 m között települő alsó kavicsos zónára is.

### **A felszín alatti vizek sajátosságai**

A felszín alatti vizek között megkülönböztetjük a talaj- és rétegvizeket. A Kalocsai-Sárköz területén, tehát a Duna K-i oldalán a talajvizek átlagos mélysége a mederközeli feltöltésben 6-8 m, távolabb 4-5 m mélyen alakult ki. Utánpótlásukat kisebb részben a csapadékból, nagyobb részben a Duna magas vízállás idején a folyamból kapják.

A talajvíz mennyisége itt eléri a 3-4 l/s.km<sup>2</sup>-t, a Duna menti területen pedig még a 7 l/s.km<sup>2</sup>-t is. Kémiai jellege kalcium-hidrogénkarbonátos, míg a zártabb mélyedésekben már a kationok között a nátrium kerül az első helyre. A szulfát tartalom Pakstól É-ra 300 mg/l, máshol 60 mg/l. A part közeli 2-3 km-es sávától távolabb a sótartalom meghaladja a 250 mg/l-t, tehát a talajvíz öntözésre alkalmatlan. Keménysége is eléri a 25-35 nk°-ot.

A mélyebben fekvő 100 m alatti vastagságú víztározó üledékréteg anyaga főleg pannóniai homok. A benne tárolt rétegvíz átlagos mennyisége 1-1,5 l/s.km<sup>2</sup>.

A kutak ebből általában 200 l/p-es vízhozamokat szolgáltatnak, de az egyes kutak hozama között jelentős eltérések vannak. Kémiai jellegre nézve a kalcium-magnézium-nátrium hidrogénkarbonátos típusok nagyjából egyenlő arányban fordulnak elő, de helyenként a kloridos típus is jelentkezik. 50 %-ban 18 nk°-nál keményebbek, 70 %-ban 0,5mg/l-nél nagyobb a vastartalom előfordulása.

A Kalocsai-Sárköz felszín alatti vizeitől eltérő jellegűek a Dél-Mezőföld talaj- és rétegvizei. Összefüggő talajvizet csak a löszhátak közötti völgyekben, valamint a Pakstól DNy-ra kiszélesedő magas ártéri síkon találhatunk. Ezekben a helyeken 2-3 m a talajvíz mélysége, míg a löszhátak alatt – ahol egyáltalán van – 8-10 m mélyen találjuk, sőt a Duna menti magaspart alatt már 25-30 m-ig süllyed a talajvíz.

Mennyiségük átlagosan 1,5-2 l/s.km<sup>2</sup>-re becsülhető. 80 %-ban kalcium és magnézium hidrogénkarbonátos jellegűek. Elzártabb mélyedésekben a nátrium is felbukkan. Ezzel jár kifejezetten kemény – 25-35 nk°-os – jellegük is.

A rétegvizeket tároló homokos pannon rétegek mélysége itt is eléri a 100 m-t. A rétegvizek mennyiségét 1 l/s.km<sup>2</sup>-re becsülik. A kutak átlagos fajlagos vízhozamát pedig 100 l/p.m-re számítják. Kémiai jellegük kalcium és magnézium hidrogénkarbonátos, keménységük eléri a 18 nk°-ot. Vastartalmuk 50 %-ban haladja meg a 0,5 mg/l-t, míg felerészben a 2 mg/l-t is elérik.

### **A felszín alatti vizek összetétele és agresszivitása**

Az atomerőmű és térségének talajvizei az atomerőmű építését előkészítő nagyszámú talajmechanikai feltárás során vett vízmintákból ill. a kifejezetten a talajvíz megfigyelésére létesített figyelőkutak vizsgálatából ismertek.

A későbbiekben a tervezett bővítési munkálatokat megelőzően ugyancsak számos geotechnikai feltárásból származó vízminta minőségvizsgálata készült el.

A vízminőség-vizsgálatok célja elsősorban a mélyépítéssel, alapozási létesítményekkel kapcsolatos paraméterek meghatározása volt. Ennek megfelelően elsősorban a talajvíz agresszivitásának meghatározása került előtérbe.

A vizsgálatok döntő részében a vonatkozó műszaki előírásoknak megfelelően a kalcium, magnézium, nátrium, kálium, ammónium, nitrát, lúgosság, hidrogénkarbonát, klorid, szulfát, pH, valamint a szabad és mészagresszív széndioxid, ill. az oldott oxigéntartalom került meghatározásra. A rétegvizek minősége az 50-200 m közötti rétegekben beszűrözött vízműutak vizsgálataiból ismert. (Tolna m. KÖJÁL).

A klorid-tartalom a vízáadó rétegek mélységével növekszik. A vizsgálatok szerint Paks térségében és az erőműnél sem a talajvízben, sem a felsőpannóniai rétegekből származó rétegvizekben klorid-anómália nem mutatható ki. Sós vizeknek mélyből történő feláramlása így a nagy térségben nem valószínűsíthető.

### **A pleisztocén homokos kavicsrétegek talajvízminősége:**

A talajmechanikai feltárások során vett vízminták vizsgálatai alapján a talajvíz minősége kisebb-nagyobb helyi eltérésektől eltekintve egységesnek tekinthető.

- a pH enyhén lúgos, 7,0-8,01 között változik, de jellemzően 7,5-7,9 közötti,
- az oldottanyag tartalom alacsony vagy közepes, 270-926 mg/l között változik, jellemzően 300-400 mg/l,
- az összes keménység 11,8-43,2 nk°, átlagosan 15-25 nk°,
- nátrium 0-104 mg/l,
- kálium 0-19 mg/l,
- kalcium 55,7-145,3 mg/l,
- vas 0,17-10 mg/l, átlagosan 0,5-1,0 mg/l,
- mangán 0,3-1,9 mg/l, átlagosan 0,3-0,8 mg/l,
- ammónium 0-14 mg/l, átlagosan 0,1-0,3 mg/l,
- nitrát 0-125 mg/l,
- klorid 3,2-70 mg/l, jellemzően 20-30 mg/l,
- szulfát 10-400 mg/l, jellemzően 100-150 mg/l,
- hidrogénkarbonát 229,9 -495 mg/l,
- szabad CO<sub>2</sub> 20-108 mg/l, jellemzően 40 mg/l,
- mészagresszív CO<sub>2</sub> 0,0 mg/l,
- oldott oxigén 0-2,5 mg/l.

A pleisztocén réteg talajvize beton és vasbeton szerkezetekre jellemzően nem agresszív.

Néhány észlelőkút vize cementkötésű szerkezeti anyagok használata esetén enyhén agresszív. Vasra pH < 7,7 esetekben, – mivel mészagresszív szénsav nincs jelen – enyhén agresszívnek minősül. A mérési adatok alapján a talajvíz szulfát-agresszivitásával nem kell számolni.

### **A pannon rétegvizek vízminősége:**

A rétegvizek minőségét a Csámpa 64.-65. kataszteri számú vízműutak vízminőség vizsgálataiból ismerjük.

A sekélyebb 50-76 m mélységben szűrözött 64. sz. kút vize alacsony oldottanyag tartalmú magnézium-kalcium hidrogénkarbonátos típusú. Klorid-ion koncentrációja csekély, szulfát csupán nyomokban fordul elő.

- pH 7,8
- kalcium 5,71 mg/l
- magnézium 60,8 mg/l
- vas 1,58 mg/l
- mangán 0,05 mg/l
- nitrát nyomokban
- klorid 15,5 mg/l
- szulfát nyomokban
- hidrogénkarbonát 164,7 mg/l
- szabad CO<sub>2</sub> 8,31 mg/l
- mészagresszív CO<sub>2</sub> 0,0 mg/l
- oldott oxigén 0,0 mg/l

A pannon rétegben mélyebben, 149-211 m között beszűrözött 65 sz. vízműkút vize már magasabb oldottanyag tartalmú, nátrium-hidrogénkarbonátos típusú. A klorid koncentráció közel tizenkétszerese, a hidrogénkarbonát több, mint négyszerese a 64. sz. kútnál tapasztaltnak.

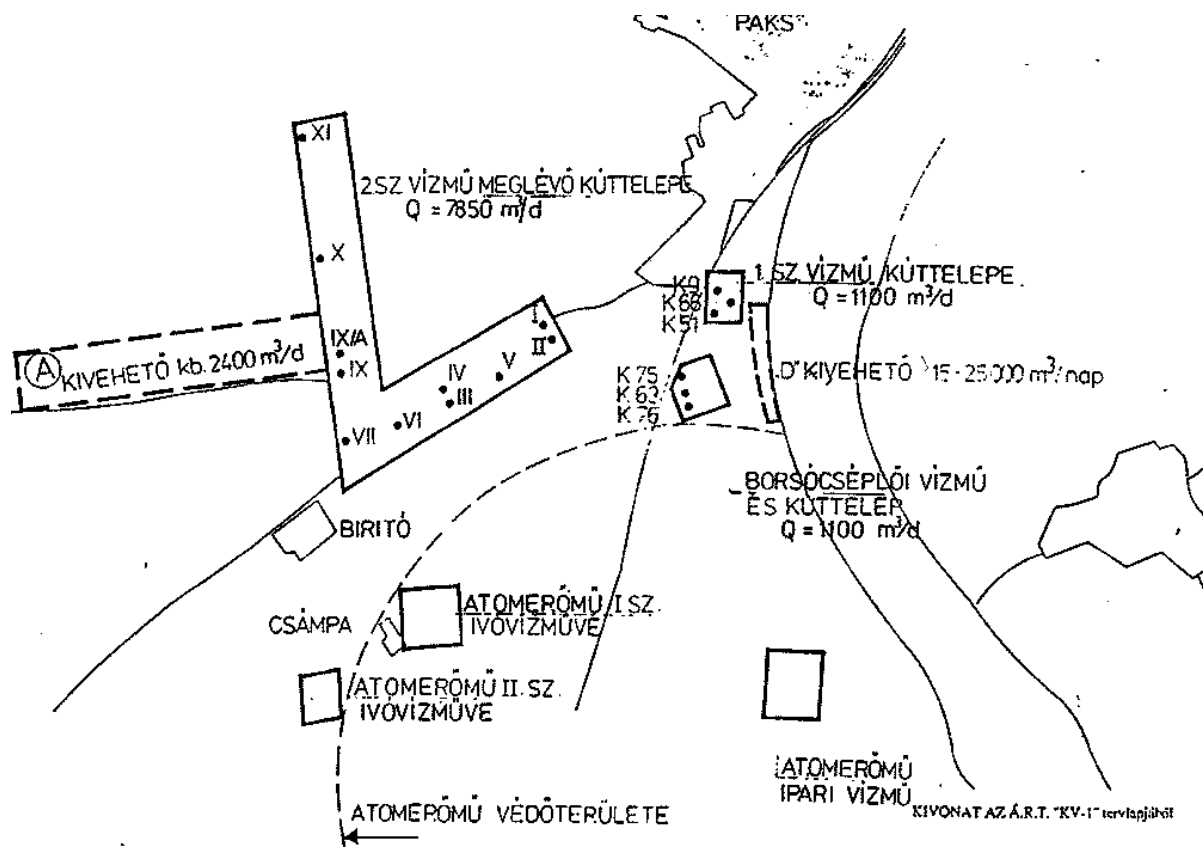
- pH 7,9
- kalcium 28,6 mg/l
- magnézium 10,9 mg/l
- vas 5,70 mg/l
- mangán 0,15 mg/l
- nitrát 0,0 mg/l
- klorid 188,5 mg/l
- szulfát 0,0 mg/l
- hidrogénkarbonát 720,0 mg/l
- szabad CO<sub>2</sub> 0,0 mg/l
- mészagresszív CO<sub>2</sub> 0,0 mg/l
- oldott oxigén 2,01 mg/l

## 6.2. Vízhasználat és vízbázisok

Az erőmű közvetlen és tágabb környezetében a felszín alatti vízkészletek hasznosítása alapvetően a parti szűrészű kutakra épülő ivóvíznyeréssel történik. A felszínhez legközelebb eső talajvizet a közvetlen környezetben csak a házak udvaraiban és zártkertjeiben lévő, egyedileg fűrt 20-25 m-es kutakból használják. A közvetlen környezetben található vízműveket a 39. ábra mutatja. (A nagyobb teljesítményű vízművek kútjai a rétegvizekbe nyúlnak le.)

Az erőmű alatt a Duna bal partján meglévő vagy kijelölt partiszűrészű vízbázisok az alábbiak:  
Üzemelő vízbázisok: Kalocsa - Baráka vízbázis, Baja városi Vízmű vízbázisa, Dunafalva vízbázisa, Pécs - Mohács Regionális Vízbázis  
Távlati vízbázisok: Bátya - észak, Bátya - Fajsz, Fajsz - Dusnok, Sükösd - észak, Leneskert, Bezerédi-sziget, Újmohács - dél.

39. ábra: Vízbeszerzési lehetőségek helyszínrajza



Az üzemelő és a potenciális parti szűrésű vízbázisok jellemző adatait a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: Az üzemelő és potenciális parti szűrésű vízbázisok [6]

Folyópart	Vízbázis neve	fkm	Fedő vastagság [m]	Vízadó vastagság [m]	Vízadó fekü [m]	Potenciális hozam [1000 m <sup>3</sup> /nap]
Bal	Kalocsa-Baráka	1521-1524	3-5	20-40	35-40	45
Bal	Baja	1480-1484	2-6	30-45	30-50	40
Bal	Szeremle-É	1474-1477	5-8		25-35	50-100
Bal	Szeremle-D	1465-1468	4-7		20-30	200
Bal	Pécsi-Mohácsi reginális	1449-1463	5-10	15-30	25-35	150
Bal	Homorud	-1447	5-12		25-35	
Jobb	Gerjen-É	1516-1523	5-10	25	25-45	40
Jobb	Dombori	1507-1512	5-20	35-40	25-55	52
Jobb	Bogyiszló	1500-1506	5-20	20-40	25-55	60
Jobb	Gerebec	1489-1493	15-25	15-30	30-55	36
Jobb	Koppány	1480-1487	15-25	20-25	30-50	42
Jobb	Cimerfok	1469-1475	15-25	15-20	30-40	36
Jobb	Bata	1465-1467	5-15	10-15	15-30	36
Jobb	Kölked	1438-1446	5-10	20-25	30-40	25
Jobb	Erdőfü	1433-1436	5-10	25	30-40	25



Az üzemelő vízbázisok együttes kapacitása 83.000 m<sup>3</sup>/nap, a távlati vízbázisok becsült együttes kapacitása 140.000 m<sup>3</sup>/nap. Az Erőműhöz legközelebbi vízbázis a Kalocsa-Barákai, mely mintegy 3-6 km-re található a melegvízes csatorna betorkolásától. (Vízbázis 1520,5-1523 fkm, melegvízes csatorna 1526,160 fkm.) Ez a vízbázis biztosítja a Kalocsa Kistérségi Vízmű vízellátó hálózatához tartozó 15 település vízellátásának nagy részét.

A közvetlen környezetben a legjelentősebb ipari vízfelhasználó a Paksi Atomerőmű. Az alábbi vízrendszerek forrása felszín alatti víz: az ivóvíz esetében a csámpai kutak, az ipari- és tűzvíz rendszer esetében a partiszűrésű kúttelep.

### **A felszín alatti vizek hasznosítása az erőmű környezetében**

#### *Paks*

Pakson a városi lakosság évi vízfogyasztása 1995 óta nem sokat változott, 572-578 ezer m<sup>3</sup> között ingadozott. Ez a volumen 10 m<sup>3</sup>/év feletti egy főre eső vízfogyasztásnak, ill. 28-29 l/fő/nap fajlagos lakossági vízfelhasználásnak felel meg.

A városnak szolgáltatott teljes vízmennyiség 1995 és 1998 között 992 ezer m<sup>3</sup>-ről 895 m<sup>3</sup>-re csökkent, ami 10%-os visszaesést jelent három éven belül. Ez a jelenség elsősorban a gazdasági célú vízfogyasztás terén megfigyelhető csökkenéssel magyarázható.

A Paks belterületének D-i végénél elhelyezkedő városi vízmű napi víztermelő kapacitása 11 000 m<sup>3</sup>, ami több mint 40 %-kal haladja meg a város napi 7800 m<sup>3</sup>-es vízfelhasználását.

Az atomerőművet – mint legnagyobb vízfelhasználót – külön műszaki vízügyi infrastruktúra szolgálja, emellett a Paks külterületéhez tartozó Felső-Csámpán külön vízmű is szolgáltat vizet az erőmű számára.

A város legnagyobb gazdasági célú vízfelhasználói a rendszerváltás időszakában – leszámítva az atomerőművet – a Paksi Állami Gazdaság, a Paksi Konzervgyár és a Dunamenti Mezőgazdasági Szövetkezet voltak. Mára közülük csupán a Dunamenti Mezőgazdasági Szövetkezet maradt meg (részben), amely állattenyésztéssel, növénytermesztéssel, szőlőtermeléssel és borászattal egyaránt foglalkozik. Emellett Paks Biritó külterületi részén gazdálkodik a Szőlőtermesztő és Borászati Kft., a gyapai külterületi részen pedig a GYAFIK Szántóföldi Növénytermesztő Mezőgazdasági Szolgáltató és Forgalmazó Kft.

A városon belül a városi strand és a tanuszoda tartoznak a legnagyobb vízfelhasználók közé. Pakson a lakosságon kívül a legnagyobb vízhasználók évi vízfelhasználása együttesen 320-360 ezer m<sup>3</sup> közötti.

#### *Dunaszentbenedek*

Dunaszentbenedeken a lakosság évi vízfogyasztása az 1990-es évek elején még lényegesen meghaladta a 30 ezer m<sup>3</sup>-t. A népességszám csökkenése, de még inkább a vízdíjak komoly mértékű emelkedése miatt ez a mennyiségi érték 1995-re 28 ezer m<sup>3</sup>-re, 1997-re 27 ezer m<sup>3</sup>-re csökkent, ami 1998-ban sem változott. Ez 28,5 m<sup>3</sup>/lakos fajlagos értéknek (vagyis 77,1 l/fős napi vízfelhasználásnak) felel meg. Ehhez az értékhez járul még kb. 14–18 ezer m<sup>3</sup>-nyi locsolásra felhasznált, más forrásból (főként fűtő kutakból) nyert víz. Ásott kút a településen csak elvétve fordul elő, használatukkal már az 1980-as évek elején felhagytak.

A település legnagyobb gazdasági célú vízfogyasztója az Új Hajnal Mezőgazdasági Szövetkezet, amely két község (Dunaszentbenedek és Géderlak) mezőgazdasági területein gazdálkodik. A helyi termelőszövetkezet állattenyésztési – szarvasmarha és sertéstartás –

tevékenységének vízigényét – 4–5 ezer m<sup>3</sup> – a községtől DK-re elhelyezkedő tsz-területen felállított 2 hidrolóbusz segítségével fedezi.

A községet ivóvízzel ellátó vízmű a kalocsai székhelyű KALOCSAVÍZ Kft. kezelésében van. A Bács-Kiskun megye K-i részén 19 községet – köztük Dunaszentbenedek, Géderlak és Uszód – és Kalocsát egységes vízellátó rendszer fűzi fel. A Kft-hez tartozik az Uszódtól 3,5 km-re D-re megépített napi 16 400 m<sup>3</sup> kapacitású Baráka Vízmű, amelynek 12 kútja látja el többek között Dunaszentbenedeket is ivóvízzel. A Baráka vízműtelepen a kutakból kitermelt vizen először elvégzik a vas- és mangántalanítást, majd ezután továbbítják a vizet a közüzemi hálózatba.

#### *Dunaszentgyörgy*

A helyi évenkénti vízfogyasztás alakulása Dunaszentgyörgyön jelentős mértékű csökkenést mutat. Az 1995. évi 87 ezer m<sup>3</sup> volumenű lakossági vízfelhasználás 1996-ban 61 ezer m<sup>3</sup>-re, 1997-re 59 ezer m<sup>3</sup>-re esett vissza, ami két év alatt közel 33%-os csökkenést mutat. Ez azt jelenti, hogy a fajlagos fogyasztás mennyisége az 1995. évi 31,8 m<sup>3</sup>/lakos értékről 1997-re 21,7 m<sup>3</sup>/lakosra csökkent le. További 30-34 ezer m<sup>3</sup> vizet használ – becslések szerint – a lakosság (részben fűrt kutakból) elsősorban öntözővíznek. Az ásott kutak szerepe az öntözésben jelentéktelen.

A település legnagyobb gazdasági célú vízfogyasztója a helyi tsz. Állattartó telepeinek becsült évi vízfogyasztása 8–9 ezer m<sup>3</sup>. Hidrolóbusza a községtől Ny-ra elhelyezkedő külterületen áll.

A Dunaszentgyörgyöt közüzemi vízzel ellátó vízmű helyben van, tulajdonosa a helyi önkormányzat, kezelője a Tolnai Vízmű Kft. Tolna székhellyel. A község Ny-i részén elhelyezkedő vízmű kapacitása 800 m<sup>3</sup>/nap. Három kútjából általában csak kettő üzemel. A kutakhoz arzénmentesítő berendezés kapcsolódik a 150 m mélyről kitermelt víz magas arzéntartalmának semlegesítése céljából.

#### *Géderlak*

A községben a helyben lakók évi vízfogyasztása stabilan 32-34 ezer m<sup>3</sup> között mozgott az utóbbi néhány évben. Az egy főre jutó lakossági vízfelhasználás ennek megfelelően csak kevéssé csökkent (1995: 29,8 m<sup>3</sup>/fő; 1997: 28,9 m<sup>3</sup>/fő). Átszámítva napi fogyasztásra ezt az értéket, hozzávetőlegesen 79-81 liter vizet használ fel átlagosan naponta egy géderlaki polgár. Becslések alapján további 10-12 ezer m<sup>3</sup>, fűrt kútból származó víz szolgál a községben öntözési és egyéb vízfelhasználási célokat.

A település legnagyobb nem lakossági vízfogyasztója a Dunaszentbenedek és Géderlak mezőgazdasági területein egyaránt gazdálkodó Új Hajnal Mezőgazdasági Szövetkezet, amelynek tehenészetében az évi vízfelhasználás 4-5 ezer m<sup>3</sup> között mozog. A mezőgazdasági vállalkozói kör évi vízfelhasználása 1-1,5 ezer m<sup>3</sup>-re becsülhető.

A Géderlakot ivóvízzel ellátó vízmű a kalocsai székhelyű KALOCSAVÍZ Kft., amely Dunaszentbenedek községhez hasonló módon látja el a lakosságot ivóvízzel (adatait lásd ott).

#### *Uszód*

Uszód lakosságának évi vízfogyasztása az 1990-es évek elején már jóval 40 ezer m<sup>3</sup> feletti értékeket jelzett, majd megindult a lassú csökkenés. 1997-ben és 1998-ban 37 ezer m<sup>3</sup> vezetékes vizet használt fel a község, ami 32,8 m<sup>3</sup>/fős – napi értékre átszámítva 89,9 l/fős –

vízfogyasztással volt egyenlő. Ez a volumen kiegészült kb. 16-18 ezer m<sup>3</sup>, öntözésre használt lakossági vízfelhasználással, főként fűt kutakból nyert víz révén. Ásott kutat vízkivételi célra nem használnak a községben.

A község legnagyobb gazdasági célú felhasználója a helyi Egyetértés Mezőgazdasági Szövetkezet, amely Uszód K-i részén hidroglobusszal rendelkezik. Az állatállomány itatására gazdálkodása során évi kb. 6-7 ezer m<sup>3</sup> vizet használ fel. A község mezőgazdasági vállalkozóinak vízfelhasználása évi 2-4 ezer m<sup>3</sup>-re becsülhető.

Az Uszód lakosságát ellátó, és a KALOCSAVÍZ Kft. kezelésében lévő Baráka Vízműtelep a községtől 3,5 km-re D-re létesült, nem messze a Duna partjától. (A vízműre vonatkozó információkat lásd Dunaszentbenedeknél!)

Az atomerőmű 5-6 km-es körzetének lakossági vízfelhasználási adatait a 3. táblázat tartalmazza.

**3. táblázat: Az atomerőmű 5-6 km-es körzetének lakossági vízfelhasználása, 1997. [7]**

Település	1997. évi lakosság-szám, fő	Lakosságnak szolgáltatott vezetékes víz, 1000 m <sup>3</sup>			1 főre jutó vezetékes vízfelhasználás, m <sup>3</sup> /év
		1995	1996	1997	
Paks	21022	574	578	572	27,2
Dunaszentbenedek	959	28	29	27	28,1
Dunaszentgyörgy	2709	87	61	59	21,7
Géderlak	1105	34	34	32	28,9
Uszód	1227	41	39	37	32,8
Összesen	29019	764	741	727	25,0

### 6.3. A „Környezetvédelmi-, telephely- és vízjogi engedélyezési kérdésekhez kapcsolódó telephely-jellemzési program felszín alatti vizek hasznosítási lehetőségeivel foglalkozó monitoring alprogram” 2003 első felében értékelhető eredményei

#### *2002 évben létesített Környezetvédelmi monitoring rendszer kiépítésének áttekintése és célja*

A parti szűrésű víz a folyóból és kisebb arányban a háttérből nyert víz keveredéséből áll. A vízfolyás vízminőségétől és annak mindenkorai vízállásától döntően függ a kitermelhető víz minősége. A vízfolyás és a vízadó rétegek közötti áramlási tér mikrobiológiailag aktív, legfontosabb szakasza a mederüledék határfelülete. E határfelület kialakulásához hosszú idejű egyensúlyi állapot kell. A kémiai összetevőkre nézve a parti szűrésű rendszerben a szűrőréteg számos szilárd fázisú alkotója, pl. agyagásványok, vas-, mangán- és alumínium hidroxidok, szerves anyagok képesek a felszínalatti víz disszociált és nem disszociált alkotórészeinek megkötésére.

Egy általános kiépítésű *teljes szelvény*, az élővízfolyás jobb és bal partján telepített, *két fél szelvényből* áll. A fél szelvények nem feltétlen szemben helyezkednek el egymással. Egy fél szelvény a hullámtéren telepített horizontális, vagy vertikális mederszondákból, valamint a Dunától távolodva többnyire a mentett oldalon telepített figyelőkút, vagy kutakból áll. A horizontális mederszonda a Duna meder alatt 2.5 m mélységben, a hőcsóva alatti, illetve a

hőcsóva és a partél közötti élővízfolyás által okozott közvetlen vízkémiai és mikrobiológiai hatások megfigyelését szolgálja.

A vertikális mederszonda a kisvízi dunai partél és a közvetlen mögöttes háttér talajvizének vízkémiai és mikrobiológiai kölcsönhatását észleli. A mögöttes hullámtéren, vagy a mentett oldalra telepített figyelőkutak a háttér talajvíz vízminőségi állapotát jellemzi.

#### ***A vertikális mederszondák telepítésének elve***

A vertikális mederszonda kútpárok telepítését (40. ábra) az határozta meg, hogy a talajvíztartó összlet utánpótlódási körülményei nem azonosak a sekélyebb és a mélyebb fekvésű víztartó rétegek esetében.

A felszínközeli homokos porózus összlet a Duna élővízfolyásának felső mederéle felől kapja közvetlen utánpótlódását, ezáltal az utánpótlódó vízrészecske „szűrési hossza” lecsökken, így várható, hogy ezen a szinten a biológiai aktivitás és a szerves szennyeződésből eredő hatások, azaz a dunai vizek hatása természetes körülmények között erőteljesebben jelentkeznek.

A „*sekélyebb*” vertikális mederszondákat 10-15 m közötti mélységig telepítettük le.

Közvetlen mellettük lettek a „mélyebb” szintre telepítve a vertikális mederszondák, amelyek talpmélysége a 25-28 m között lett kialakítva.

Ez a mélységszint biztosítja, hogy a *mélyebb mederszondák*, a porózusabb homokos kavics alluviális víztartó összlet fizikokémiai és mikrobiológiai körülményeit észlelje.

Ebben a mélységtartományban a felszínalatti vizek utánpótlódása, a mindenkori partétől távolodva az élővízfolyás sodorvonalának meder része felől történik.

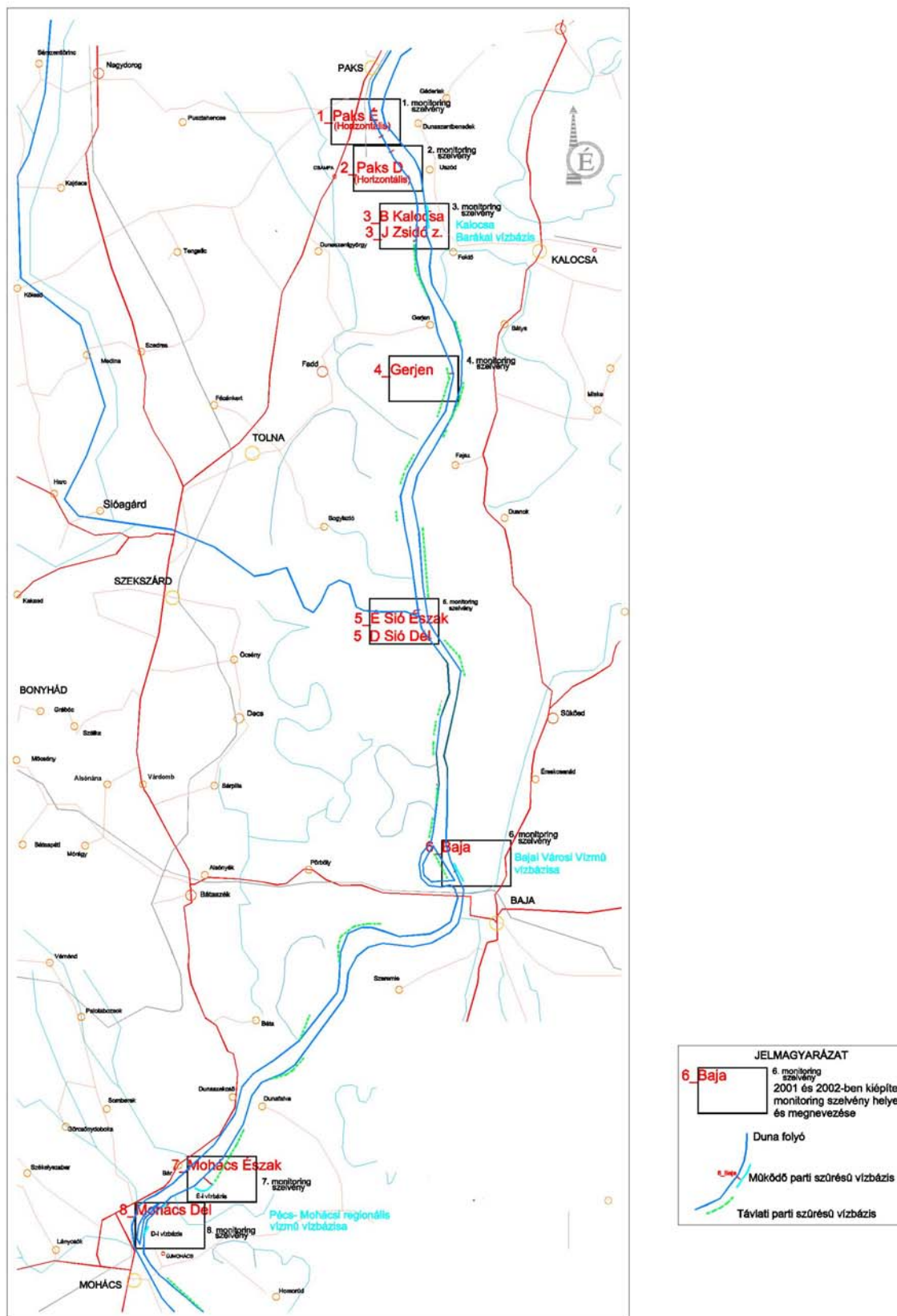
A vertikális mederszondák telepítésével, tehát elemezhetővé válnak, a különböző mélységszintek és ezzel egyidejűleg az élővízfolyás partételtől távolodó mederszakaszok vízminőségi változásai is megfigyelhetővé válik.

A dunai víznek a hőcsóva okozta felmelegedés hatásának vizsgálata során, a meglévő és a potenciális partiszűrési vízbázisokra gyakorolt hatásának elemzésénél, tehát három alap helyzetet vizsgálhatunk a kiépített monitoring rendszer segítségével.

Vízbázis által közvetlen befolyásolt hullámtér (Bajai vízbázis), a vízbázis által közvetett módon befolyásolt hullámtér (Kalocsa-Baráka, Mohács Mohács-sziget), valamint a meglévő természetes állapotot (dunai jobb part potenciális vízbázisainak a helyein) lévő hullámtéren.

A Sió torkolat északi és déli helyzetének vizsgálatánál egy olyan természetes állapotot észlelünk, amikor más felszíni víz (Sió-csatorna) okozta hatás is jelentkezhet.

40. ábra: Átnézetes helyszínrajz a monitoring rendszer szelvényeiről



## Az elvégzett vízvizsgálatok köre

**Vízkémiai vizsgálatok** (2002-ben végzett vizsgálatok száma: 74 db)

**Víztoxikológiai és mikroszkópos biológiai vizsgálatok** (2002-ben végzett vizsgálatok száma:66+53 db)

**Trícium vizsgálatok**(2002-ben végzett vizsgálatok száma:12 db)

A vizsgálatokat a **VITUKI Rt. III. vízminőség-védelmi Intézet Központi Környezetanalitikai Laboratórium** Vízkémiai Osztály és Hidrobiológiai Osztály végezte.

**Bakteriológiai vizsgálatok** (2002-ben végzett vizsgálatok száma:43 db)

A vizsgálatokat az **Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat Budapest Fővárosi Intézete** Közegészségügyi Biológiai Laboratóriumi Osztály Környezetmikrobiológiai Laboratórium végezte.

A vízmintákat, azok helyszíni kémiai vizsgálatait a Kék Csermely Bt. végezte.

## Az eredmények értékelése

### A vízminőségi vizsgálatok eredményeinek összefoglaló értékelése

Megállapítható, hogy a legtöbb mederszonda, termelőkút és figyelőkút vize elsősorban a magas ammónium ion tartalma miatt rossz, nem megfelelő minőségű. Néhány esetben már nagyobb nitrát tartalom is megfigyelhető, ami szintén alátámasztja az előbbi megállapítást.

Az egyéb mutatók közül a szerves szennyeződést jelző KOI és nitrit, továbbá a többi a vízminőségi osztályozásban határértékkel nem rendelkező többi komponens között kiugróan magas értéket nem találtunk.

Külön fel kell hívni a figyelmet a vas- és mangán-ionok mennyiségére (különösen az utóbbi), amelyek magas értékei szerint a legtöbb vizsgált víz a III.-V. vízminőségi osztályba sorolható.

### Az ökotoxikológiai vizsgálatok eredményének összefoglaló értékelése

Az érvényben levő MSZ EN ISO szabvány előírásai szerint nem kifogásolható a vizsgált víz, ha abban az állatok pusztulása nem haladja meg az 50%-ot. Az ivóvíz szabvány ugyanezt 10%-ban állapítja meg, ami a kísérleti hibaszázalék körüli érték.

A különböző módon vett vízminták eredményeit összehasonlítva megállapítható, hogy a horizontális mederszondák vizeiben (Paks hideg- és melegvíz csatorna, Duna víz Baja) és a vertikális mederszondákban az állatok pusztulása igen kismértékű volt. Sok esetben nem volt pusztulás, de annak mértéke max. 3-7% között változott, ami még az ivóvíz szabvány szerint sem kifogásolható.

A figyelő- és termelő kutakban ezzel szemben nagyobb, 3-23% közötti pusztulást tapasztaltunk. Ez még szintén nem kifogásolható, de azok vizében szennyező, esetleg gyengén mérgező anyagok jelenlétét jelzi.

Külön ki kell emelni a 3\_B szelvény Kalocsa - Baráka térség kútjait, melyek hígítatlan (nyers) vizében minden esetben bekövetkezett az állatok kisebb-nagyobb mértékű pusztulása. Egy alkalommal az összes kísérleti állat elpusztult, ami annak erősen toxikus hatását jelezte, vizét ekkor csak hígítás után lehetett volna felhasználni. A Daphnia-teszt eredményei a mederszonda vizének szennyezett (mérgező) állapotát mutatja.

### A mikroszkópos biológiai vizsgálatok eredményeinek összefoglaló értékelése

Általánosságban az állapítható meg, hogy a különböző módon vett vízmintákban az algák száma a Dunához viszonyítva rendkívül kevés volt, annak csupán a 0,1-1%-át tette ki. Az előkerült fajok a Duna vízének domináns fajai. A legtöbb víz ezért megfelel említett ivóvíz minősítő szabvány előírásainak.

Az egyes horizontális és vertikális mederszondák, figyelő és termelő kutak vizében talált nagy mennyiségű szerves törmelék, baktériumtelep és fonalas baktérium, vas- és mangánhidroxid csapadék, továbbá a színtelen ostorosok változó egyedszáma azonban felhívja a figyelmet arra, hogy a szűrőrétegek hatékonysága nem minden esetben megfelelő. A vas- és mangánhidroxid kiválás a víz oxigénviszonyainak a megváltozásával magyarázható (anaerób-aerob viszonyok megváltozása). A jövőben ennek lehetséges okait mindenképpen célszerű lenne megvizsgálni.

### A bakteriológiai vizsgálatok eredményeinek összefoglaló értékelése

A PA2/1 HMSZ Paks Dél Melegvíz csatorna és PA2/2 HMSZ Paks Dél Melegvíz csatorna mederszondáiból vett víz minősége ivóvíz minőségű.

A többi vizsgált horizontális és vertikális mederszonda és figyelőkút vize is jó minőségű. Ki kell emelni a Bajai vízmű 10 termelőkútját, amelynek a vízminősége az egyik vizsgálat alkalmával jó volt, később azonban a szerves szennyezést mutató baktérium-szám alapján III.-IV. osztályú.

## **6.4. Az atomerőmű hidrológiai környezetének vizsgálata modell segítségével**

Az atomerőmű környezetének modellezéséhez a Visual MODFLOW nevű programcsomag került kiválasztásra. A csomagot négy önálló program alkotja, amelyeket a Visual MODFLOW kapcsol össze:

1. MODFLOW. Áramlási modell kidolgozására szolgál.
2. MODPATH. Részecskepályákat, sebességeket, elérési időket számol a MODFLOW segítségével kialakított áramlási modell alapján.
3. ZONEBUD. Vízháztartás számítása.
4. MT3D. Transzport kód, amely a felállított áramlási modell alapján a talajba került szennyeződések terjedését vizsgálja (anyagtranszport).

### **A programok elve és alkalmazási lehetősége**

#### **MODFLOW**

A MODFLOW segítségével elkészíthető egy adott terület háromdimenziós hidrológiai modellje. A talajvíz mozgása porózus közegben három dimenzióban parciális differenciálegyenlettel írható le, melynek analitikai megoldása csak kivételes esetben lehetséges, helyette numerikus közelítést lehet alkalmazni. A MODFLOW ún. véges differencia módszerrel számol: a terület térképe és hidrológiai szelvénye alapján megszerkesztett háromdimenziós hálóban az egyes cellák közepére oldja meg numerikusan a differenciálegyenleteket, a megoldáshoz a bemenő adatokat felhasználva mint kezdeti és határfeltételeket. A számítás eredményeként megkapjuk a terület piezometrikus vonalainak térbeli elhelyezkedését, a víz sebességének térbeli eloszlását (irány és nagyság szerint). Minél

finomabb felosztást készítünk, annál jobb közelítés érhető el, a felbontást a használt számítógép memóriája és a számolási idő korlátozza.

A MODFLOW segítségével statikus (stady state) vagy az időbeli változást figyelembe vevő (transient) szimuláció végezhető. A statikus modellhez egyetlen adatsorra van szükség, ezt a kiindulási állapotot állandónak tekinti, ez alapján ábrázolja az áramlási viszonyokat. A tranziens modell a területen történt változásokat figyelembe veszi. Ebben az esetben időben változó piezometrikus térképeket kapunk. Mindkét modell típus esetén a figyelőkutakban mért vízszintértékeket a modell összehasonlítja a számított értékekkel, így a felállított modell helyességét ellenőrizni tudjuk.

### **MODPATH**

A víz által szállított részecskék pályáját, sebességüket, elérési időket számol a MODFLOW segítségével kialakított áramlási modell alapján. A részecskék sebességvektora merőleges a piezometrikus vonalakra, a sebesség nagyságát a hidraulikus potenciál-különbség határozza meg. Segítségével meghatározható, hogy egy adott időpillanatban egy adott helyen található konzervatív szennyező bizonyos idő elteltével hol fog tartózkodni, merre halad, mennyi idő szükséges ahhoz, hogy egy bizonyos távolságra elérjen. Vagy fordítva: honnan indulhatott és mennyi időre volt szükség ahhoz, hogy az adott helyre érjen. A programnak a MODFLOW bemenő adatain kívül más bemenő adatra nincs szüksége, mindössze azt kell megjelölni, hogy hol tartózkodnak azok a részecskék, amelyeknek a mozgását nyomon kívánjuk követni.

### **ZONEBUD**

Vízháztartás számítására szolgál. Az egész modellenre, egyes rétegekre vagy kijelölt zónákra kiszámítja a beérkező és távozó víz mennyiségét, ellenőrizhető ezáltal, hogy a vízháztartás (egyensúly) szempontjából az áramlási modell kidolgozásánál helyesen adtuk-e meg a határfeltételeket (csapadék, párolgás, termelő kutak, folyók, tavak vízhozama).

A Visual MODFLOW-hoz hozzáadhatók további programok is, ezek között szerepel az MT3D háromdimenziós transzport kód.

### **MT3D**

Reaktív transzport kód, amely szervesen kapcsolódik a MODFLOW-hoz, csak azzal együtt futtatható. A modell a talajvízbe került szennyezők advekciónak és szorpciónak szimulálására szolgál. A szorpcióba beleértendő az abszorpció, adszorpció, ioncsere és a talajszemcséken kémiai reakciók következtében fellépő megkötés. A szennyezés terjedésének számításánál figyelembe vehető a radioaktív bomlás ill. biodegradáció.

Szükséges bemenő adatok:

1. Kezdeti szennyezés koncentráció. Értéke a vizsgált terület egyes részein eltérő lehet.
2. Később bekerült, vagy folyamatosan bekerülő szennyező koncentrációi. Lehet állandó koncentrációkat, csapadékkal bekerülő szennyeződést, párolgás következtében fellépő bedúsulást figyelembe venni. Valamennyi külön-külön és együttesen is szerepelhet, a vizsgált terület különböző részein eltérő lehet.
3. Az egyes rétegekben a kőzet sűrűsége.
4. Szorpciós együtthatók. Radioaktív és biológiai szennyezők esetén a bomlásállandók.
5. Longitudinális, tranzverzális és vertikális diszperziós tényezők, diffúziós állandók az egyes rétegekre.
6. A megfigyelő kutakban mért szennyezés koncentrációja, amely szintén nem a modell futtatásához, hanem ellenőrzéséhez szükséges.



A modell választásunk szerint lineáris és nem-lineáris szorpcióval számol. Ha feltehető, hogy a megkötött anyag mennyisége egyenesen arányos a vízben oldott anyag koncentrációjával, lineáris szorpcióval számolhatunk (híg oldatok). A nem-lineáris közelítések közül a Freundlich izoterma exponenciális kapcsolatot tételez fel a megkötött és oldott anyag mennyisége között, míg a Langmuir izoterma figyelembe veszi, hogy a kőzet egy adott érték fölött nem képes több anyagot megkötni. Ennek tömény oldatok esetén van jelentősége, híg oldatokra megegyezik a lineáris közelítéssel.

Az MT3D-vel végezhető statikus és tranziens szimuláció. A tranziens modellhez itt is különböző bemenő paramétereket adhatunk meg az egymást követő stressz-periódusokra, de a periódusoknak meg kell egyezni a MODFLOW-ban megadott időkkal. Amennyiben tranziens modellként futtatjuk, a szennyezés terjedését csak a vizsgált időszakra fogja bemutatni. Ha statikus modellel dolgozunk, becslés tehető a szennyezés jövőbeni terjedésére és eloszlására.

## A Visual MODFLOW adaptálása az atomerőmű hidrológiai környezetére

### *Kezdeti feltételek*

A modell kidolgozásának első lépése a háromdimenziós háló megszerkesztése volt az erőmű és környékének digitalizált térképe és a figyelőkutak által határolt rétegek alapján. A modell alapjául meghatározott terület kiterjedése helyi koordináták szerint -400-4600 m K-Ny irányában és 10500-14000 m É-D irányában. Ez egy 35 sor x 50 oszlop hálóban lett elhelyezve, amelyet az erőmű környékén 50x50 m felbontásra finomítottak). A rétegek felületének pontos megszerkesztéséhez nem volt elegendő adat, így közelítésként sík határoló felületekkel és becsült átlagos rétegvastagságokkal került kidolgozásra. Rendelkezésre álltak a figyelőkutakban mért vízszintek értékei 1984-től, ezekből megállapítást nyert, hogy a talajvíz szintje a 92 mBf magasságot sehol nem érte el. Mivel a MODFLOW a „száraz” réteget a számításoknál nem tudja figyelembe venni, ezért a modell szerinti „felszint” 92 mBf-re tették. Az egyes kutak által határolt rétegvastagságokat összevetve megállapítható, hogy a legfelső réteg (homok) vastagsága 8-15 m között változik, így átlagos vastagságára 12 m fogadható el. Ennek megfelelően a homokréteg alja 85 mBf-nek tekinthető a modellben (a 12 m-t a tényleges felszíntől, 97,15 mBf-től számították). Hasonló megfontolások után a kavicsos homok réteg alját 78,5 mBf-nek, a kavicsréteg alját 57 mBf-nek vették. Az R-63 kút 63-57 mBf között agyag/agyagos kőzetliszt réteget határolt, alatta ismét homok réteg helyezkedett el. Az R-63 kúttól kb. 250 m-re lévő, szinten mBf-ig mélyített R-64 nem harántolta az agyagot, tehát itt a vízzáró réteg alacsonyabban helyezkedik el. A vízszint értékek alapján látható, hogy az R-63 kútban mért vízszintek lényegesen magasabbak, mint az R-64-ben mért értékek és meghaladja a Duna vízszintjét is. Ez a kút az agyagréteg alatt van szűrőzve, tehát vízszintjét nem a talajvíz, hanem az agyagréteg alatti rétegvíz nyomása határozza meg. Régebbi  $\delta^{18}\text{O}$  mérések már utaltak arra, hogy a területen jelentős rétegvíz feláramlás van. Ezek alapján jogosnak látszott, hogy az agyagrétegen belül folytonossági hiányt tételezzenek fel és ezt vegyék figyelembe a modellben. A kapott információk alapján a KKÁT területe alatt kb. 10 m-rel mélyebben található a vízzáró réteg, mint a terület más részein, így ezen a szinten, 47 mBf értéknél határozható meg a modell alsó határa.

Az egyes rétegek hidraulikus vezetőképességét ( $K_{x,y,z}$ ) és porozitását ( $n$ ) a rendelkezésre álló adatokból, a specifikus tároló képességeket ( $S_s$ ) és a specifikus áteresztő képességeket ( $S_y$ ) táblázatból vették. Mindezek alapján az alábbi bemenő adatok kerültek alkalmazásra: lásd 4. táblázat.

**4. táblázat: Modell bemenő adatai**

szint [mBf]	Kőzettípusok	$K_x (K_y)$ [m/s]	$K_z$ [m/s]	Ss [1/m ]	Sy [-]	n [-]
1. 92-85	Homok	$10^{-5}$	$10^{-6}$	0.005	0.25	0.35
2. 85-80	kavicsos homok	$8 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$	0.0005	0.2	0.3
3. 80-78,5	kavicsos homok	$8 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$	0.0005	0.2	0.3
4. 78,5-57	Kavics	0.001	0.001	0.0001	0.15	0.25
5. 57-54,5	Agyag	$10^{-8}$	$10^{-9}$	0.1	0.05	0.45
6. 54,5-47	Homok	$10^{-5}$	$10^{-6}$	0.005	0.25	0.35

**Határfeltételek**

Az 1-4 rétegekre érvényes vonatkoztatási vízszintet SURFER segítségével állapították meg. Az elővizsgálatok alapján meghatározható, hogy hol helyezhető el a vonatkoztatási szint (ahol a vízszint már nem változik lényegesen). Itt az R-63 kútban mért értékekből indultak ki. A vizsgálatokból szembetűnően látszik, hogy a kútban mért vízszintek – a kút mélysége és Dunától mért távolsága ellenére – meglepően jól követik a Duna vízjárását, de átlagosan 3 m-rel meghaladják a Duna vízszintjét.

Ezért ez az érték került elfogadásra vonatkoztatási szintnek.

A számítások során kiderült, hogy a terület áramlási viszonyait igen erősen befolyásolja a Duna, a hidegvíz csatorna, a halastavak és a Kondor tó. A tranziens modell felállításánál a Duna és a hidegvíz csatorna egy adott időszakban észlelt vízállását vették figyelembe, a halastavak vízszintje állandó, 90,2, a Kondor tó vízszintje 90,3 mBf, állandó. A szennyezés terjedési modellhez felállított statikus modellhez az általában jellemző közepes vízállást vették alapul. A Duna meder 79 mBf., a hidegvíz csatorna medre 81 mBf, a halastavak medre 98,4 mBf.

Figyelembe kívánták venni a területen lévő épületeket is. Mint kiderült, az áramlási viszonyokat számottevően nem befolyásolják az épületek. Igen erős viszont a halastavak és a hidegvíz csatorna hatása.

A modell kialakításához felhasználásra kerültek a figyelőkutakban egy negyedéves időszakban legjellemzőbb vízszint mérések eredményei. Az egyes időpontokhoz tartozó mérési adatsorokból SURFER segítségével kiszámították a piezometrikus vonalakat, ezek összevetésre kerültek a MODFLOW által számított piezometrikus térképekkel. A kutak a modellezett terület viszonylag kis részén helyezkednek el, ezért a SURFER térképeket csak a modellezett terület kis részére (az erőmű közvetlen környezetére) lehetett megszerkeszteni, de még ezen a területen is extrapolációra volt szükség, mert pl. a halastavak környékén nincsenek figyelőkutak. Ezért a MODFLOW-val készült piezometrikus térképeknek csak az erőmű közvetlen környezetére vonatkozó része vethető össze a SURFER térképekkel.

**IRODALOMJEGYZÉK**

- [1] A Paksi Atomerőmű földrengésbiztonsága, szerk.: Marosi Sándor – Meskó Attila – Akadémiai Kiadó, 1997.
- [2] VVER 440-213 Seismic Hazard Re-evaluation, PHARE Project No.:4.2.1, Ove Arup, Contract No 94-06000
- [3] Site Investigation of Site Response and Liquefaction Potential, Interpretative Report, Ove Arup & Partners, London, October 1995.
- [4] Site Investigation of Site Response and Liquefaction Potential, Final Report, ISMES, Bergamo, August 1995.
- [5] Earthquake Hazard Assessment at Paks NPP Site, GeoRisk Kft., Budapest, 2001.
- [6] Környezetvédelmi-, telephely- és vízjogi engedélyezési kérdésekhez kapcsolódó telephely-jellemzési vizsgálat. Monitoring rendszer a Paksi Atomerőmű hűtőrendszerének a Duna vizére és a parti szűrésű vízbázisokra gyakorolt környezeti hatása ellenőrzésére. ETV-ERŐTERV Rt., 0000K00ERA00014, 1999. december
- [7] Bács-Kiskun és Tolna megye statisztikai évkönyvei, KSH, Bp. 1998.