

Meskó Attila  
az MTA rendes tagja

# KÖRNYEZETTUDOMÁNY, KÖRNYEZETI GEOFIZIKA

Elhangzott 1996. április 10-én

A környezettudomány még csak születőben van. Az már világosan látszik, hogy szinte minden klasszikus diszciplína ismeretanyagát fel kell használnia. A természettudományok közül a biológia és a földtudományok mellett támaszkodik a kémiára és a fizikára, de a műszaki tudományok és a társadalomtudományok több területére is. A jelenségek és folyamatok leírásában nélkülözhetetlen a matematika, a nagy tömegű adat kezelésében az informatika. Végül a különböző tudományágak mozaikjait egységbe kell foglalni annak érdekében, hogy környezetünkről teljes képet kapjunk, és állapotát az emberi élet számára továbbra is biztosítani tudjuk.

Az élet megőrzésében, továbbadásában és lehetőség szerinti javításában általában is rendkívüli fontosságú a tudomány szerepe. A tudomány nem valamilyen misztikus, különleges tevékenység. A józan ész kiterjesztése pontos megfigyelés, mérés, matematikai leírás révén, melynek célja a világ működésének megismerése. Bár elsődlegesen tudást, azaz ismereteket kívánunk szerezni, többnyire ezek fel is használhatók. A tudományos ismeretek alapján konstruált eszközök egyaránt használhatók jó és rossz célok megvalósítására. A történelem tanúsága szerint a tudomány eredményeit igen sokszor az emberiség általános jólétének növelése helyett hatalom és haszon szerzésére használták. Ebben ma sem látható lényeges javulás. Számos ország nemcsak atom-, de kémiai és biológiai fegyvereket is fejleszt. A rendelkezésre álló arzenállal a teljes emberiséget, sőt szinte a teljes bioszférát már többszörösen el lehet pusztítani. A gazdag országok már nemcsak a szegény – eufemizmussal „fejlődőnek”

nevezett – világ nyersanyagait, olcsó munkaerejét, de már génállományát is „hasznosítják”. Eközben évszázadok óta folyik a természet, környezetünk pusztítása és mérgezése.

Az egyre nyilvánvalóbban látszó bajokért sokan a tudományt teszik felelősé. Mások úgy vélik: már eleget tudunk, pusztán ügyes menedzseléssel minden gond megoldható. Mindkét állításnak éppen az ellenkezője igaz. Nem a tudomány a felelős az egyre hatékonyabb fegyverekért, a profit növelésének egyre kifinomultabb módszereiért – melynek következménye egyes régiók, kontinensnyi területek lakosságának kilátástalan nyomora –, hanem gátlástalan, lelkiismeretlen felhasználói. Még jó szándékú emberek, csoportok részéről is gyakori a felelősség elhárítása. Megelégszenek azzal, hogy maguk szándékosan nem okoznak kárt. Ez azonban kevés. Fel kell hívni a figyelmet a megismert veszélyekre, gondolkodni kell, hogyan kerülhetők el a katasztrófák, és cselekvésre kell ösztönözni mindenkit, aki tehet valamit a kedvezőtlen események kivédése érdekében.

Gondjaink megoldásához több ismeretre van szükség. A világról keveset tudunk, és az eddigiehez hasonló „ügyes menedzselés” a gondokat csak fokozni fogja. Bár ellenvélemények sokasága is teret kap, egyre többen gondolják, hogy rossz úton haladunk. Az erőforrások kíméletlen és a profit maximalizálását egyetlen célnak tekintő kihasználása, mely a termelőtevékenységek kedvezőtlen következményei iránti közömbösséggel párosul, belátható közelségbe hozta a természeti környezet és ezzel az emberi élet feltételeinek pusztulását.

A székfoglalót emiatt annak szentelem, hogy rövid áttekintést adjak az emberiség és a tágabb értelemben vett környezet viszonyáról, a környezet megőrzésének fontosságáról. Végül a környezettudomány egy kis – de számomra különösen kedves – szeletével, a környezeti geofizikával foglalkozom. Néhány módszerét és egyik fontos feladatát, a földrengés-veszélyeztetettség meghatározását vázolom.

## Az emberiség és környezet viszonya (rövid történeti áttekintés)

Az emberiség történetének során mindig is függött a természettől. A függés kezdetben teljes kiszolgáltatottságot jelentett. Egy rövid időszakban az ipari forradalom sikerei, a tudomány és technika csodálatos alkotásai azt a benyomást keltették, hogy a kiszolgáltatottság megszüntethető, szinte bármi megtehető korlátozás nélkül. A 20. század végén azonban világossá vált, hogy a környezet állapota rövidesen az időközben hatmilliárdnyira növekedett emberiség legnagyobb problémája lesz. A kiszolgáltatottság megszüntethető vagy csökkenthető, de a függés nem.

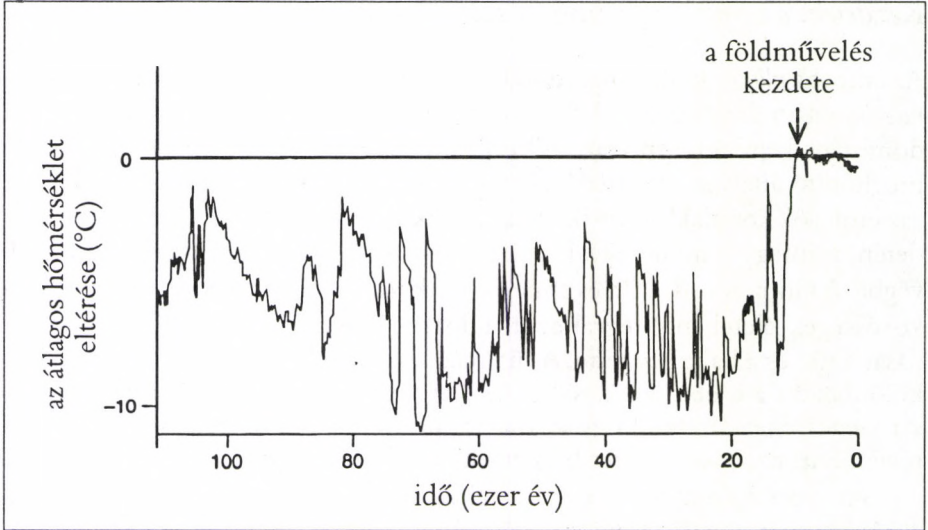
*Kezdetek: az ember a környezet szülötte és felhasználója*

Az ember a *pliocén* korban fejlődött ki *hominida* őseiből, melyek az emlősök *kainozoikum*ban felvirágzó családjába tartoznak. A *kainozoikum*ban az állati élet domináns képviselői már az emlősök voltak, és gyors fejlődésüket, a világot meghódító általános elterjedésüket azzal is kifejezik, hogy a *kainozoikumot* „az emlősök korának” nevezik. A *kainozoikum* legvégén, azaz a *pleisztocén* kezdetén, mintegy 2 millió évvel ezelőtt lényeges környezeti változások mentek végbe. A klíma zorddá vált, és ennek következményei voltak a növény- és állatközösségek életében. Megváltozott a flóra és a fauna. Az ember életben maradását a tűz és a balta segítette. A tűz meghódítása előtt az ember nem sokban különbözött a többi ragadozótól. Az élete fenntartásához és továbbadásához szükséges energiát az elfogyasztott táplálék adta a szervezet metabolizmusa révén. E lassú folyamatban a hőmérséklet és az energiasűrűség alacsony. A tűz viszont gyors átalakulás. Az égés az éghető anyag napsugárzásból fotoszintézis révén szerzett kémiai energiáját szabadítja fel. A tűz nemcsak különböző táplálékokat tesz ízletesebbé vagy fogyaszthatóvá, de olyan mikroklimát is teremt, mely lehetővé teszi, hogy birtokosa életben maradjon zord, hideg vidéken is.

A legutóbbi évek tudományos vizsgálatai – elsősorban grönlandi mélyfúrásokból származó jég- és üledékminták analízise – mutatták, hogy a legutóbbi tíz-tizenegyezer év éghajlata különlegesen kedvezően alakult. A vizsgálható időszak nagyjából 110 ezer év volt. Ennek nagy részében az éghajlat gyorsan és szeszélyesen változott egy nagyon hideg és egy a maihoz képest közepesen hideg állapot között. Mintegy 20 nagy, globális változást lehetett meghatározni. Mindegyikük gyorsan, néhány évtized alatt zajlott le. Az utolsó, egészen napjainkig terjedő időszak nemcsak az előzőeknél enyhébb, de sokkal kisebb ingadozásokat mutató, stabil éghajlatot hozott. Ez adott lehetőséget arra, hogy érdemes legyen földműveléssel foglalkozni (1. ábra).

A földművelés megváltoztatta a táplálkozási és hidrológiai ciklusokat, de lehetővé tette a föld kiszarolását is, felgyorsítva az eróziót és a kiszáradást. A történelem előtti korban a rablógazdálkodás elég gyorsan elérte azt az állapotot, amikor az elpusztított környezetben további művelés már nem volt érdemes, és elvándorlásra kényszerítette a földműveseket. Voltak példák arra is, amikor éppen a helyes gazdálkodás hosszú ideig megővta a környezetet, és azonos helyen is biztosítani tudta az élet lehetőségét. Amikor azonban az egyensúly egy idő után minden erőfeszítés ellenére mégis megbomlott, a föld és a kultúra lehanyaglott, és együtt pusztult el.

A mezőgazdaság számára fontos volt az évszakok ismerete és előrejelzése, különösen azokon a tájakon, ahol a vetés és aratás időpontja kritikus. A Nap és



1. ábra. Az átlagos hőmérséklet (°C-ban) a jelenlegi hőmérséklethez viszonyítva az utóbbi mintegy 110 ezer évben. A meghatározások az oxigén-18- és oxigén-16-izotópok arányán alapszanak. Hidegebb klímában a nehezebb izotóp mennyisége kisebb. A minták a Grönlandot fedő jégpáncélon mélyített fúrásokból származtak. A klíma a jelenleginél hidegebb volt, gyakori gyors ingadozásokkal. A mezőgazdaság kezdete tökéletesen egybeesik a 11 ezer éve stabilizálódott kedvező klímával

a csillagok helyzete és mozgása alkalmasnak bizonyult az előrejelzésre, kifejlődött a csillagászat. Már Kr. e. 2700-ból részletes *asztronómiai* számításokról tudunk. A csillagászati elképzelések, majd a *kozmológiák* egy igen lényeges, ma is érvényes felismerésre utalnak: az ember és környezete csak egy hatalmas, szinte elképzelhetetlenül nagy és rendkívül bonyolult rendszer piciny eleme.

Már a késői *neolitikumban* egy új tényező lépett a föld és ember kapcsolatába: a fémek és a fémolvasztás fölfedezése. Őseink már a történelem előtti korban fölfedezték az első ércbányákat, és megtanulták, hogyan lehet a fémeket az ércből kivonni. Az ércbányák birtoklása jólétet és gazdagságot hozott. Ezért hosszú felfedezőutakat tettek, és a régészet tanúsága szerint az utak célja sokszor az ércet kutatása volt. Az építéshez és fazekassághoz kőre és agyagra is szükségük volt. Ezeket másutt találták meg. A sikerhez több kellett, mint az érc vagy a jól használható agyag pusztá felismerése. Meg kellett találni azt a környezetet is, ahol a keresett anyag egyáltalán előfordulhat. Megint más anyagokat használtak a festéshez, és ezek egy része is a földből származott. Az ásványok és kőzetek ismerete, mely előkészítette a *geológia* kialakulását, legalább tízezer éves

múltra tekint vissza. A mezőgazdaság mellett a bányászat a második ősi kapocs az emberiség és a föld között.

A természet pusztító erőit – a vulkánkitöréseket, földrengéseket, viharokat, az áradásokat és aszályokat, a klíma hosszú idejű romlását – már nagyon korán elszenvedte az emberek egy-egy csoportja. A katasztrófák hatása azonban csak akkor vált igazán jelentőssé, amikor az ipari forradalom során a nagy városokban sérülékeny infrastruktúra és nagy népsűrűség alakult ki. Csak egyetlen példa: az 1995 januári földrengés *Kobéban* (Japán) amellelt, hogy több mint 6000 emberéletet követelt, jóval több kárt okozott, mint hazánk egyévi nemzeti jövedelme.

### *Mezőgazdasági és ipari társadalmak*

A mezőgazdasági társadalmak lényegében a Nap energiáját hasznosították. A föld művelésével, teraszok kialakításával, később öntözéssel, növények és állatok nemesítésével, mások kiirtásával elérték, hogy azonos nagyságú terület sokkal több ember eltartására legyen képes, mint a gyűjtögetés és vadászat. A bioszféra „megművelt” része hatékonyabban hasznosította a Nap energiáját. A napsugárzás a szél és a víz energiájának is, mely szélmalomokat és vízimalmokat hajthat. Az erdők hosszabb időszak alatt halmozzák fel anyagukban a Naptól származó energiát. Az erdők kiirtásával gyorsan hozzá lehet jutni több száz év napsugárzásának tárolt energiájához – de csak egyszer. A mezőgazdasági társadalmak fejlődése elé áthághatatlan korlátot állított a rendelkezésre álló energiaáram véges nagysága.

Az ipari forradalom nem lett volna lehetséges a fosszilis energiahordozók felhasználása nélkül. A mezőgazdasági és ipari társadalmak közötti döntő különbség az, hogy a mezőgazdasági társadalmak közvetlenül a napenergiát hasznosítják, az ipari társadalmak a fosszilis napenergiát – a szenet, olajat és gázt – használják. A fosszilis energiahordozók szintén a Nap energiájának és a fotoszintézisnek köszönhetik létüket, melyet kedvező geológiai folyamatok, kedvező körülmények között, a föld mélyében számunkra megőriztek. Kialakulásukhoz évmilliókra volt szükség, felhasználásuk gyorsasága nem kevésbé rablógazdálkodás, mint az őserdők kivágása. A „föld alatti őserdők” meglévő készlete a kitermelés jelenlegi üteme mellett rövidebb ideig elegendő, mint az ipari társadalmak kialakulásához szükséges idő.

Az ipari forradalom 200 éves történetében ugyanúgy szerepe volt a fa hiánya miatt a szén kényszerű felhasználásnak, a gőzgépek, majd a belső égésű motorok feltalálásának, mint a hirtelen jött energiabőségnek – amit a fosszilis energiahordozók biztosítottak. De szerencsés geológiai véletlenek is szerepet ját-

szottak. A szén ismert volt a mezőgazdasági társadalmakban is, de csak vég-szükségben használták fel tüzelőanyagként a fa helyettesítésére. A vasolvasztásban is inkább faszenet alkalmaztak. 1 tonna nyersvas előállítására, majd finomítására nagyjából 50 köbméter fára van szükség. Ez pedig 10 hektárról termelhető ki. Az angol vasgyártás a 17. századtól a 18. század közepéig stagnált a faszén állandó hiánya miatt. A szén felhasználása döntő változást hozott. 1 tonna szén nagyjából 1 hektárról kitermelhető fa energiatartalmával azonos energiát ad. Az angol acéltermelést és az ehhez szükséges energiát biztosító (az egyre növekvő mennyiségben felhasznált szénnel azonos energiatartalmú) erdőterületet az 1. táblázat adja meg.

1. táblázat

*Az angol acéltermelés (kovácsoltvas-termelés) biztosításához szükséges erdőterület, feltételezve faszén használatát*

Éves átlag	Acéltermelés (1000 tonna)	Ekvivalens erdőterület (1000 km <sup>2</sup> )
1620	19	1,9
1690	23	2,3
1720	25	2,5
1781–1790	69	6,9
1800–1814	127	12,7
1820–1824	669	66,9
1850–1854	2716	271,6
1900–1904	8778	877,8

Mivel Anglia területe nagyjából 150 000 km<sup>2</sup>, nyilvánvaló, hogy a 19. század közepén már akkor sem lehetett volna ezt a mennyiséget előállítani, ha az egész országot erdő borította volna és minden egyes fából faszenet állítanak elő. Megjegyezzük, hogy a széntermelés az első világháború előtti utolsó békeévben, 1913-ban 287,4 millió tonna volt, és ez jóval nagyobb erdőterülettel egyenértékű, mint az ország teljes területének tizenötszöröse. Angliában azonban bőségesen volt szén – a Tyne völgyében a felszínen is –, és a nagyvárosokba vízi úton könnyen el is lehetett szállítani. A szerencsés geológiai és geográfiai adottságok valószínűleg döntő szerepet játszottak abban, hogy az ipari forradalom Angliából indult világhódító útjára. A Ruhr-vidéken vagy Sziléziában is van szén, de csak nehézkesen, szárazföldi úton lehetett szállítani, Olaszországban vagy Görögországban bármit lehetett vízi úton szállítani, de nincsen számottevő széntelep.

Az ipari társadalmakban szükség volt nyersanyagok és termékek gyakori és nagy tömegű szállítására. Ez a föld és ember között ismét új kapcsolatokat alakított ki. Csatornákat ástak, vasutat és utat építettek, megsokszorozódott a tengeri közlekedés. Még később, már századunkban a repülés a légkörnek és folyamatainak vizsgálatát tette életfontosságúvá, bár ennek csírái már a tengerhajózás idején megvoltak, hiszen a vitorlás közlekedés a szelek, óceáni áramlatok, partok, árapály mellett a szelek ismeretét is igényelte.

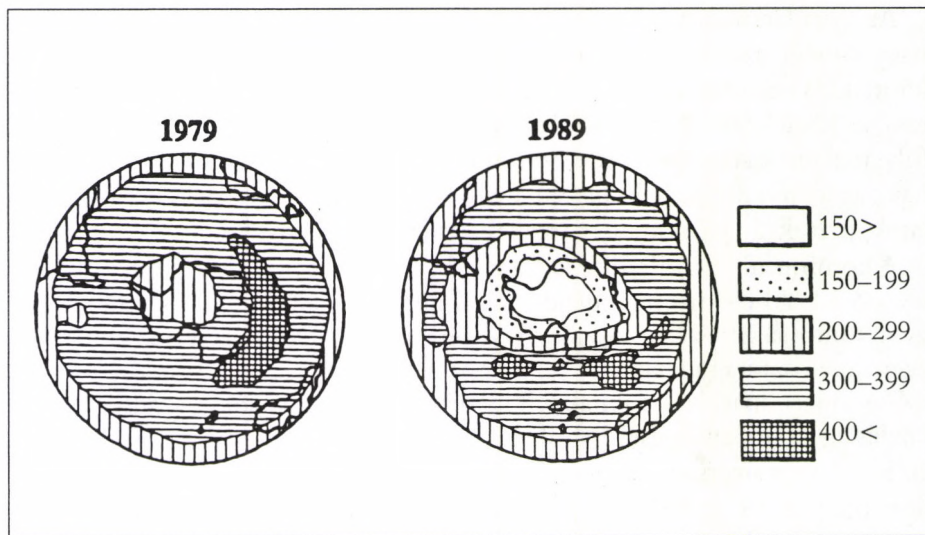
A kommunikáció kifejlődése, kezdetben a távíró, majd a telefon, rádió, televízió a Föld elektromos tulajdonságai iránti érdeklődést keltette fel, és nagyon fontossá tette az atmoszféra felső rétegeinek megismerését, az ionoszféra és magnetoszféra kutatását.

A modern ipari társadalmak fejlődésében a nyersanyagok, a szállítás és hírközlés egyaránt lényegesek. Amikor az ipari társadalmak gyarmatbirodalmakat építettek ki, a nyersanyagforrások világméretű kutatása és kitermelése kezdődött meg. A 19. század közepétől azonban megszűnt a geográfiai expanzió lehetősége. Az emberiség rádöbbent a Föld véges méretére. Kevés birtokba vehető, művelésre alkalmas lakatlan földterület maradt. Új területek birtokbavétele helyett már csak elfoglalt területeket lehetett valakitől elvenni. Ez nemzeti és nemzetközi válságokhoz vezetett. Mivel a rablógazdálkodás évezredes beidegződése megmaradt, az újrafelosztást lokális háborúkkal, majd a 20. században világháborúkkal próbálták kieroszakolni, mérhetetlen szenvedést okozva százmillióknak.

### *A környezet jelenlegi állapota*

A népesség az utóbbi 200 évben csak megnyolcszorozódott, de az ipari termelés a két évszázaddal ezelőttinek legalább a százszorosára nőtt. A világ vízfogyasztása alig száz év alatt tizenötször nagyobbá vált. Közben mintegy hetvenezer új vegyi anyagot állítottak elő, amelyek bejutottak a levegőbe, a vízbe és a talajba. Ezek egy része mérgező, és az élővilág számára teljesen ismeretlen, emiatt az alkalmazkodásnak még az esélye sincsen meg. Más részük ugyan nem mérgező – ilyenek például a freonok (halogénezett szénhidrogének) –, de más, kedvezőtlen hatásuk ugyanolyan pusztító lehet. A sztratoszférába feljutó freonok katalizálják az ózon lebontását, az ózonburok elvékonyodása pedig – most még csak a sarkok felett és nagyobb szélességeknél, de egyre növekvő kiterjedésben – egyre több ibolyántúli sugarat enged lejutni a tengerszintre. A változás gyorsaságát illusztrálja a 2. ábra.

A világ trópusi őserdőiből évente két magyarországnyi területet irtanak ki, s arra lehet számítani, hogy a zárt trópusi erdők a jövő század első felében eltűn-

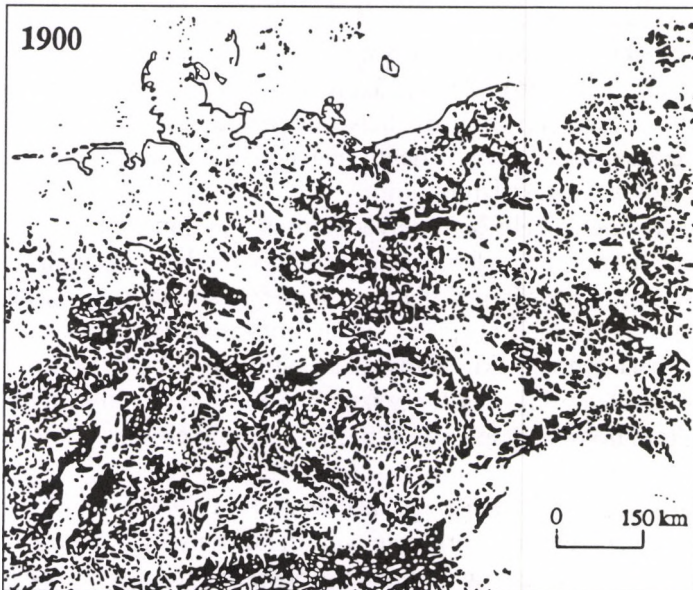
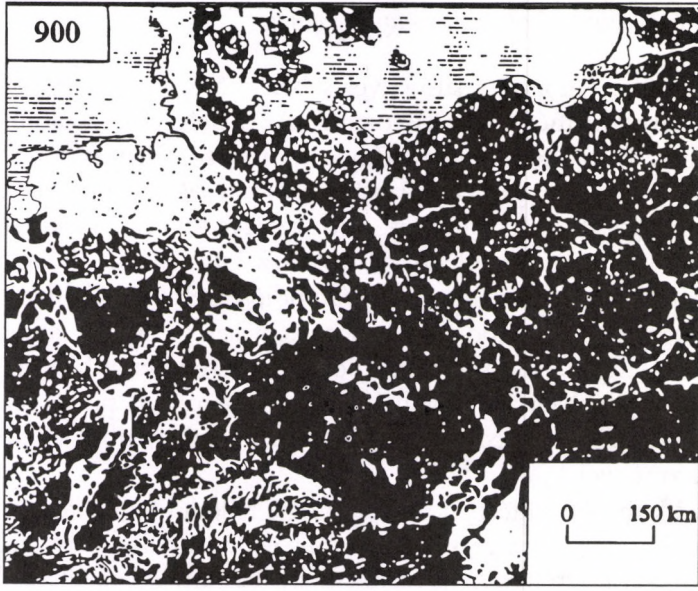


2. ábra. Az ózon koncentrációja (Dobson-egységekben mérve) a sztratoszférában az antarktisi tavasz (október) kezdetén 1979-ben és 1989-ben

nek a térképről. Európa erdőit két évezred, az Egyesült Államok erdőit néhány évszázad alatt tarolták le (3. ábra). A folyamat napjainkra felgyorsult. A kéntartalmú szenek elégetése és más ipari folyamatok a földi és vízi ökológiai rendszerek savasodását okozzák. Az erdőirtás és a nem körültekintő mezőgazdasági művelés talajvesztéssel vagy legalábbis talajdegradációval jár: sivatagosodás, a nem megfelelő öntözés miatt szikesedés csökkenti a termőképességet. A szennyeződés és a veszélyes hulladékok gondatlan elhelyezése és balesetek miatti mérgezés ijesztő méreteket ölt. A természet tűrőképességének határára jutottunk, és ez előbb-utóbb az életminőség romlásához, a nemzetek közötti ellentétek kiéleződéséhez vezet.

Az ENSZ „Környezet és fejlődés” világkonferenciáján, amelyet 1992. június 3. és 14. között Rio de Janeiróban tartottak, 173 nemzet képviselői elfogadták a 21. századra vonatkozó „Agenda 21” akciótervet. Bár a kormányfők által aláírt megállapodások, kötelezettségvállalások a várakozásoknak nem feleltek meg, de a világ figyelmét a megoldandó és részletesebben vizsgálendő környezeti problémákra irányították. Világossá tették, hogy összehangolt nemzetközi intézkedésekre van szükség, a fenyegető folyamatok csak így előzhetőek meg, illetve csak így mérsékelhetőek. A környezeti ártalmak és veszélyek nem ismerik az országhatárokat.





3. ábra. Erdővel borított területek  
(feketével jelölve)  
Közép-Európa területén 900 és 1900 között

## *Az ember és a Föld: átalakítás vagy megőrzés*

A környezet és az emberi létesítmények sebezhetősége olyan állapotot teremtettek, amivel eddig még nem találkoztunk. Az új helyzetben különböző megoldások választhatók. Ezeket négy nagy csoportba sorolhatjuk.

Az első csoport támogatói a *technológia korlátlan fejlesztését* tartják kívánatosnak. Ez a megközelítés a „fejlődést” tartja az egyedül fontosnak, és nem vesz tudomást annak pusztító mellékhatásairól. Azzal igazolja magát, hogy eddig is volt fejlődés, és mellékhatásait valahogy mindig kezelni tudták. Ez a megközelítés a rablógazdálkodás modern formája. Képviselői szívesen elfelejtik, hogy bár eszközeink fejlődése a múltban valóban sok eredményt hozott, de éppen elhanyagolt mellékhatásainak felhalmozódása okozza napjaink gondjait. A mellékhatások ma már sokszor többet nyomnak a latban, mint a fejlődés pozitív következményei.

A második megközelítésben még mindig a fejlődés volt a központi cél, de káros mellékhatásait tervezéssel, a szociális és kulturális szükségletek figyelembe vételével kísérelték meg csökkenteni. Ezt a megközelítést alkalmazta például a Szovjetunió és Kína. Kezdetben valóban sikerült a fejlődés ütemét gyorsítani. Az ipari termelés növekedése kezdetben „az ember legyőzi a természet” jelszavát is hihetővé tette a gyanútlan tömegek számára. A természetátalakítási tervek egy jelentős részéről azonban kiderült, hogy gazdasági hasznot alig hoz, a természetben azonban helyrehozhatatlan pusztítást okoz. A végeredmény is közismert: szinte megtisztíthatatlanul elszennyezett környezet, csökkenő életkor, kilátástalan nyomor.

A harmadik megközelítés – melyet szintén gyakran hallunk manapság – minden beavatkozás azonnali megszüntetését követeli. Oka a jogos aggodalom és félelem, de ez a szélsőséges álláspont nem valósítható meg a gyakorlatban, mert a természet „békében hagyása” az élet minőségének azonnali, drasztikus romlásával járna. Annak, aki villanyt akar gyűjtani, el kell viselnie erőművek létét. Remélhetőleg mindig csak egy szűk kisebbség véleménye marad. Különbözőben is kétséges, hogy meg lehetne állítani a műszaki előrehaladást, még akkor is, ha az előnyös volna.

Az általam helyesnek vélt megközelítés „*a Föld a mi kertünk*” vezérelvben foglalható össze. Gyökerei a történelem előtti korra nyúlnak vissza, összegezve a gondolkodó emberiség hagyományait. Ebben az értelemben modern változata a megvédő, megőrző gazdálkodásnak. Ellentétes a rablógazdálkodással. Például a földművelésben ez azt jelenti, hogy folyamatos figyelemmel és talajjavítással igyekezhetünk növelni a termelést, de ez nem mehet sem a termőtalaj, sem a nem megművelt földek rovására. Az ipar az olcsóbb termelés és

nagyobb nyereség érdekében nem szennyezheti a levegőt, a vizet és a talajt toxikus gázokkal, mérgekkel, nehézfémekkel – rontva ezzel a környezetben élők életminőségét és veszélyeztetve egészségét. Az energiatermelés fontos, de nem károsíthatja az ivóvízellátást, vagy nem okozhat radioaktív szennyeződést.

### *A környezet állapota Magyarországon*

A szennyező források és veszélyek térbeli eloszlása az utóbbi években módosult. Már nemcsak néhány ipari körzetre összpontosul, hanem sokkal szélesebb területre is kiterjed. Ez nem változtat azon, hogy az ipari körzetekben át kell térni környezetbarát technológiákra, hiszen ebben is súlyos adósságaink vannak. De az ipar mellett jelentős szennyezőforrás a mezőgazdaság és a közlekedés is. Megjelent a környezetszennyezés importja, nemcsak közvetlenül: ideszállított hulladék formájában, de közvetve is: környezetszennyező tevékenységek áttelepítésével. Súlyos gondjaink vannak a levegővel, vízzel és talajjal, sőt már a mélyebb kőzetrétegekkel is.

A levegőszennyezés mértékét mutatja, hogy az ország területének néhány százaléka súlyosan, mintegy tizede mérsékelten szennyezett. A rendszeresen vizsgált 90 település közül 24 minősül „szennyezettnek”, 51 pedig „mérsékelten szennyezettnek”, és csak 15 kapott „megfelelő” minősítést.

A kén-dioxid-szennyezettség a legnagyobb Tatabánya, Dorog, Miskolc, Ózd, Kazincbarcika térségében, átlagban 50–70 mikrogramm/köbméter között.

A nitrogén-dioxid-szennyezettség sorrendje: Pécs, Győr, Dorog, Eger, Komló, átlagban 50–70 mikrogramm/köbméter között.

Az üledő por mennyisége legnagyobb Dunajváros, Kecskemét, Tatabánya, Vác és Várpalota térségében, meghaladva az 50 mikrogramm/köbméter értéket.

Magyarország vízgazdálkodási adottságait alapvetően meghatározza, hogy a vízfolyások többsége az ország határain kívül ered. A folyók vízhozama, vízminősége, az árvízi veszélyeztetettség mértéke a természeti tényezőkön kívül a felvizi országok vízgazdálkodásától és területhasználatától függ. Kiszolgáltatott állapotunkat jól jellemzi, hogy a felszíni vízkészletek 95%-a külföldről érkezik.

A szeszélyesen változó csapadékmennyiség miatt az ország aszálytól (vízhiánnyal), ugyanakkor árvizektől és belvizektől egyaránt veszélyeztetett. Még nagyobb folyóink esetén sem ritka a maximális és minimális vízmennyiségek közötti több mint egy nagyságrend különbség. (Például a Duna Budapestnél tapasztalt minimális vízmennyisége 580 m<sup>3</sup>/s, a maximum 8600 m<sup>3</sup>/s, a Tisza esetében ugyanezek az adatok Szolnoknál minimum: 60 m<sup>3</sup>/s, maximum: 3820 m<sup>3</sup>/s, Szegednél minimum: 95 m<sup>3</sup>/s, maximum: 4700 m<sup>3</sup>/s.) Nagyobb árvíz esetén Magyarország 52%-a veszélyeztetett, negyede a mértékadó árszint

alá esik, ahol mintegy 2,5 millió ember él. A kisvíz-folyások hossza dombvidéken összesen mintegy 35 000 km, 1500 települést több mint 1800 kisebb vízfolyás keresztez. Az árvízveszélyes területek 97%-a mentesített, de a szükséges méretre csak a művek fele épült ki. A belvízcsatorna-rendszer a felesleges vizek 15 nap alatti eltávolítására képes. Mind az árvízvédelem, mind a belvízvédelem területén aggasztó, hogy a fenntartási munkák tartós elmaradása miatt a védelmi képesség egyre romlik, az előntések valószínűsége évről évre nagyobb.

A nagy tavak – Balaton, Velencei-tó, Fertő tó, Tisza-tó – vízminőségének védelme több éves, az egész vízgyűjtőre kiterjedő komplex vízgazdálkodási fejlesztési programok végrehajtását igényli. A folyók szabályozása során keletkezett holtágak jelentősen előregedtek, elszennyeződtek.

Az ivóvíz nagy része, közelítőleg 90%-a felszín alatti vízbázisból származik. A vízellátó művek kétharmada sérülékeny földtani környezetből termeli a vizet, ahol fennáll a szennyezés veszélye. Ilyenek például a főváros parti szűrősű vízbázisai. Országszerte szaporodnak azok az esetek, amikor jelentős többletköltséggel járó tisztítóberendezéseket kell építeni, vagy az elszennyeződött vízbázist használaton kívül kell helyezni.

A lakosság többségének van vezetékcsatlakozás. A hálózatra kapcsolt lakások ellátottsága közel 90%-os. A csatornázás helyzete lényegesen rosszabb, a csatornára kötött lakások aránya csak valamivel több mint 40%. A két érték közötti különbség, az úgynevezett közműöllő az 1980-as évektől egyre jobban kinyílt. A szennyvízkezelő program lelassult. Az összegyűjtött szennyvizek 55%-a tisztítás nélkül jut a befogadóba, és a tisztítás is csak mintegy harmadrészben felel meg az előírásoknak. Az ország több mint háromezer települése közül kevesebb mint ötszáz rendelkezik csatornahálózattal, még kevesebb szennyvíztisztító teleppel. A csatornázatlan területeken lévő közműpótló rendszereknek kevesebb mint 10%-a működik elfogadhatóan.

Az ipari vízszükségletek 50%-át a felszíni vizekből saját víztermeléssel biztosítják. Ennek jelentős része hűtővíz. Az ipari frissvíz-felhasználás ennek ellenére messze meghaladja a kommunális vízfelhasználást.

Mezőgazdasági vízhasznosítás (öntözés) csak a megművelt terület mintegy 5%-án folyik. A vízszolgáltató főművek kapacitása kihasználatlan. A Duna–Tisza közén a talajvízszint jelentősen, helyenként 6- méterrel csökkent. A nem megfelelő öntözés miatt mintegy 10 ezer négyzetkilométer nagyságú területet elsivatagosodás fenyeget.

Az országban évente 100 millió tonnát is meghaladó mennyiségű, fejenként több mint 10 tonna hulladék keletkezik. A települési szilárd hulladék mennyisége évente átlagosan 2-3%-kal nő. Az ártalmatlanítás mintegy 85%-ban lerakással történik, de a mintegy 2700 ismert lerakóhelynek csupán 30%-a felel

meg az előírásoknak. A csatornázatlanul élő lakosságnál közel évi 100 millió köbméter települési folyékony hulladék keletkezik. Ennek 90%-a elszikkad a tározók helytelen kialakítása miatt. A termelési szférában keletkezett folyékony hulladékkal együtt jelenleg évi 20 millió köbméter kezelésére van lehetőség (kevesebb mint 20%).

Az évente keletkező veszélyes hulladék mennyisége mintegy 2,5 millió tonna. Ennek 30%-a égethető el, a többi fizikai-kémiai-biológiai ártalmatlanítást igényel. Szükség volna szakszerű lerakásra és új telephelyek kialakítására. Meg kellene oldani az üzemek saját lerakóhelyein tárolt veszélyes hulladékok kezelését. Kiemelendő a meddőhányók problémája. Mintegy 3500 meddőhányón összesen 1 milliárd tonna kezelendő anyag halmozódott fel. A kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésének gondja az előkészítésre fordított jelentős összegek ellenére sem megoldott.

Az utóbbi évtizedben a környezetvédelmi szempontok háttérbe szorultak, a szükségesnél kevesebb a környezetvédelmi beruházás. Bár a nehézipar és mezőgazdaság termelésének visszaesése valamelyest csökkentette a környezet-szennyezést, de növekedett a közlekedés miatti nitrogén-oxid-kibocsátás, a kommunális szemét és hulladék mennyisége. Több tízezerre tehető az egykori vagy ma is használt szennyezett telephelyek, létesítmények száma. A kármentesítés jelenlegi üteme mellett egy évszázad kellene a részleges megtisztításra, feltéve, hogy újabb szennyezés nem történik.

Nem vigasz számunkra, de objektíven meg kell állapítani, hogy sok ország küzd hasonló – esetenként enyhébb, másutt a mieinknél is sokkal súlyosabb – gondokkal. A környezet állapota globális probléma, a szinte reménytelen helyzetből csak hosszabb idő alatt, közös erőfeszítésekkel lehet kikerülni.

Válságok előfordultak a múltban is. Bár visszatekintve, ezek kevésbé súlyosnak látszhatnak, nem szabad elfelejteni, hogy korukban a megoldásukhoz rendelkezésre álló eszközök is korlátozottak voltak. Tény, hogy a válságok mélysége és gyakorisága az idővel növekedett, és az emberiség alighanem eddigi története legnagyobb kihívásával néz szembe, amikor a Föld mint globális rendszer romlását kell megakadályoznia. Mégis reménykednünk kell, hogy úrrá tudunk lenni a lassan már létünket fenyegető veszélyeken, melyek nagy részét önmagunknak köszönhetjük. A környezettudomány fontos eszköze a racionális cselekvés előkészítésének. Mivel a levegő, víz, talaj és kőzetek állapota, az ezekben a közegekben lezajló folyamatok és változások megismerése, leírása és előrejelzése nélkül nem cselekedhetünk, a környezettudomány a földtudományok eredményeinek felhasználását, módszereinek alkalmazását nem nélkülözheti. A földtudományok egyike, a geofizika is segíteni tud több fontos környezeti probléma megoldásában.

## Környezeti geofizika

A geofizikai mérések a földben lévő anyagok közötti fizikai különbségeket tudják kimutatni. Egy hulladéktárolóból szivárgó szennyezett, a porózus kőzetrétegben lassan áramló oldatnak más az elektromos ellenállása, mint az ugyanolyan mélységben és kőzetrétegben áramló tiszta talajvíznek. Veszélyes hulladékot tároló, elásott hordóknak más a mágnesezhetősége, mint a környező vagy fedő talajé. Fémhordóknak saját mágneses terük is van – míg a környező talajnak nincsen. De még az egyszerűen csak megbolygatott talaj szerkezete és több fizikai paramétere is megváltozik. Nemcsak természet alkotta üregek, de kiásott, majd betemetett árkok is megtalálhatók geofizikai mérésekkel – még akkor is, ha évszázadok alatt új rétegek kerülnek rájuk, és felszíni nyomaik a szem számára láthatatlanná válnak.

A rugalmas hullámok visszaverődnek különböző rétegek határáról, és így a rétegek helyzete meghatározható felszínen keltett és érzékelt szeizmikus hullámokkal. De ugyanígy viselkednek elektromágneses hullámok is, melyeket a földradar használ – bár sokkal sekélyebb rétegek, de sokkal jobb felbontású, részletesebb megismerésére.

Természetesen a geofizika csak egy a környezet védelmét segítő számos tudomány közül. Hasznosak lehetnek a légi felvételek, ugyanúgy, mint a talaj és a talajvíz kémiai analízise. Elengedhetetlen a geológiai és hidrogeológiai kutatás. Bizonyos feladatokban – például a földrengés-veszélyeztetettség meghatározásában – a szeizmológia mellett a geodéziai módszerekre is szükség van hosszú időtávú mozgások felderítésére, és pontos geológiai ismereteket igényel a veszélyes felszíning terjedő elmozdulásokat is létrehozni képes vetődések, az úgynevezett „capable fault”-ok nyomozása.

Példaként néhány geofizikai módszert mutatok be, és röviden vázolok egy komplex földtudományi feladatot, a földrengés-veszélyeztetettség meghatározását.

### *Egyenáramú elektromos mérések*

Bizonyos mértékig minden anyag, így a talaj és a kőzetek is vezetnek az elektromos áramot. A vezetőképesség vagy – jobban ismert mennyiséget használva – annak reciproka, az elektromos ellenállás jelentősen függ a talaj szerkezetétől, a benne lévő pórusok méretétől és eloszlásától, az esetleges víztartalomtól és az abban oldott sók mennyiségétől, bár további, a felsoroltaknál kisebb jelentőségű tényezők is vannak. Igen kicsiny például az ellenállása – vagy ami ugyanezt jelenti: nagy a vezetőképessége – a nagy pórustérfogatú talajnak vagy laza

kőzetnek, amikor a pórusokat víz tölti ki. Kis mennyiségű oldott só ugyanis mindig van a talajvízben. Amikor a sótartalom az átlagosnál nagyobb, az ellenállás még kisebb. Ezen alapszik a mérés egyik fontos, környezetvédelmi felhasználása: hulladéktárolóból szivárgó szennyeződés felszín alatti mozgásának követése. A hulladéktárolóból, szigetelésének megsérülése esetén, ugyanis szinte mindig a normál talajvíz oldottsó-tartalmánál nagyobb koncentrációjú elektrolit szivárog. Lemérve a „gyanús” területen, néhány méterig terjedő mélységben az ellenállás eloszlását, a kis ellenállás alapján nyomon követhetjük a szivárgó anyag útját.

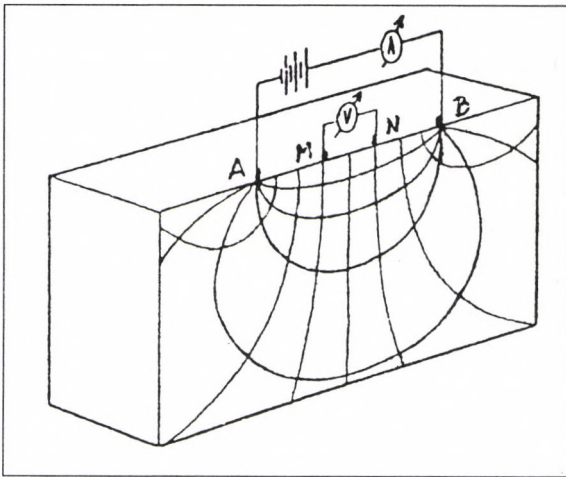
Néhány, a kutatás számára lényeges anyag fajlagos ellenállását a 2. táblázatban adjuk meg. (A fajlagos ellenállás egysége az  $\Omega\text{m}$ =ohmméter.)

2. táblázat

*Néhány, a gyakorlatban fontos kőzet fajlagos ellenállása*

Nagy fajlagos ellenállású kőzetek	Ellenállás ( $\Omega\text{m}$ )
Gránit	200–10 000
Bazalt	200–10 000
Andezit	200–10 000
Gneisz	200–10 000
Mészkö	100–5000
Dolomit	100–5000
Kis fajlagos ellenállású kőzetek	
Grafit	0,001
Tengervíz	0,2
Agyag	2–20
Agyagmárga	5–50
Márga	5–50
Változó fajlagos ellenállású kőzetek	
Homok (nedves)	20–100
Homok (sós vízzel)	1–5
Homok (kiszáradtan)	50–1000
Kavics (nedves)	50–1000
Kavics (száraz)	100–10 000
Homokkő (mállott)	5–50
Homokkő (tömör)	100–20 000

Nagy az ellenállása a szilárd, kemény kőzeteknek. Ez utóbbiak lehetnek akár kőfalak vagy más építmények eltemetett maradványai is. A vezetőképesség mérésével következtetni lehet a nagy ellenállású és eléggé nagy méretű tömbök helyzetére. De ugyanígy következtetni tudunk egykori árkok, pincék helyére is, ha a beléjük kerülő anyagok, törmelékek más szerkezetűek, például nagyobb pórustérfogatúak, mint az eredeti, bolygatatlan talaj. Az első esetben a környezetnél nagyobb, a másodikban a környezeténél kisebb ellenállás árulja el, hogy valami figyelemre méltó rejtőzhet a felszín alatt.



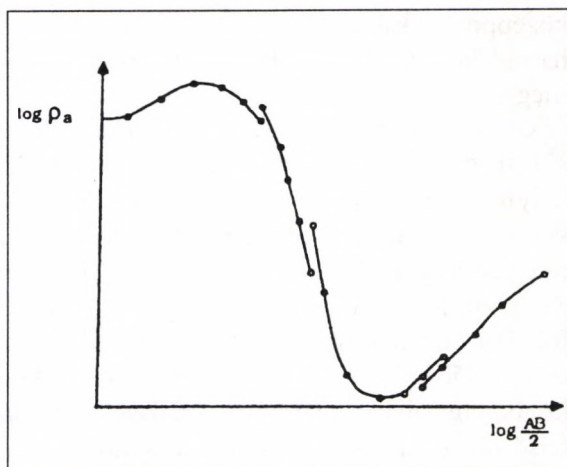
4. ábra. Az ellenállás meghatározásának egyik módszere: a talajba *A* és *B* elektródákkal áramot vezetünk, és mérjük az ennek hatására kialakuló feszültséget az *M* és *N* elektródák között

Az egyenáramú szondázást úgy végezzük, hogy a 4. ábrán vázolt módon, az *A* és *B* áramelektrodákkal egyenáramú jelet bocsátunk a talajba, és az *M* és *N* potenciálelektrodák közötti megmérjük az ennek hatására kialakuló feszültséget. A homogén, mindenütt azonos ellenállású közegben kialakuló áramvonalakat a vastag vonalak, az azonos potenciálú felületek, az úgynevezett ekvipotenciális felületek függőleges metszeteit a vékonyabb vonalak érzékeltetik. Jól látszik, hogy az áram nagy térfogatban folyik, emiatt

az áramerősségből és feszültségből csak egy nagyobb térfogatra jellemző látszólagos fajlagosellenállás-értéket tudunk kiszámítani. Tudjuk azonban változtatni az árambevezető és a potenciált mérő elektródák helyzetét. Például, amikor az árambevezető elektródák távolsága növekszik, az áram egyre nagyobb mélységekben (is) folyik. A mérési elrendezés más mennyiségeit állandó értéken tartva és a méréseket sok különböző távolsággal elvégezve, a látszólagos fajlagosellenállás- értékekből úgynevezett vertikális elektromos szondázási görbe rajzolódik ki. Ennek egy példája látható az 5. ábrán. A vízszintes tengelyen az árambevezető elektródák távolsága, a függőleges tengelyen a látszólagos fajlagos ellenállás a változó. Mindkét tengely logaritmikusan skálázott.



A szondázási görbe alakja jellemző a fajlagos ellenállás mélység szerinti változására. Könnyen áttekinthető az az eset, melyben nagyon vastag és emiatt ún. félvégtelen közeg tetején egy attól eltérő fajlagos ellenállású másik réteg van. A tapasztalatok szerint csaknem mindig a felső réteg fajlagos ellenállása a kisebb, és a vízszintes réteghatár sokszor elfogadható közelítés. Amikor az áramot bevezető elektródák távolsága kicsiny, az áram lényegében csak a felső rétegben folyik, és a kapott látszólagos fajlagos ellenállás közelítőleg megegyezik a felső réteg (valódi) fajlagos ellenállásával. Amikor az áramot bevezető elektródák távolsága nagy, az áram döntően az alsó rétegben folyik, a mérésekből levezetett látszólagos fajlagos ellenállás közelítőleg egyezik az alsó réteg fajlagos ellenállásával. A közbülső helyzetekben kapott látszólagos fajlagos ellenállások e két érték közé esnek. Ez egyben világossá teszi, miért használjuk a „látszólagos” jelzőt.



5. ábra. Egyenáramú elektromos szondázási görbe: különböző AB elektródatávolságokkal mért látszólagos fajlagos ellenállás

A szondázási görbe alakja a felső réteg vastagságától is függ. Ha a réteg vékony, már viszonylag kis árambevezető elektróda-távolságoknál kezdődik a növekedés. Ha a réteg vastag, csak jóval nagyobb távolságnál tapasztaljuk ugyanezt. Amikor több réteg van, a szondázási görbe alakja is bonyolultabb. Sok különböző távolsággal mérve azonban a bonyolultabb esetekben is meghatározhatjuk az egyes rétegek fajlagos ellenállását és a réteghatárok mélységét. Erre később gyakorlati példákat is adunk (15. ábra).

A módszerrel elérhető mérési pontosság elég jó, a hiba általában 1%-nál kisebb. A mélységeket mégis csak ennél jóval nagyobb hibával tudjuk meghatározni, ugyanis a rétegek nem vízszintesek, és a fajlagos ellenállás az egyes rétegeken belül is változik. Ezeket a tényezőket azonban a számításokban nem tudjuk figyelembe venni.

A vertikális szondázások mérésorozatát több helyen is elvégezhetjük – például egy vonal mentén, egymástól azonos távolsággal eltolt mérési elrendezés-

középpontokkal. Így eljárva, az ellenállásról egy egész szelvény mentén alkotunk képet. A legkisebb és legnagyobb AB távolságot a kutatási feladat szabja meg.

Gyors tájékozódásra az is elegendő lehet, ha egyetlen jól választott AB távolsággal végzünk méréseket. Ilyenkor az elektródák egymáshoz viszonyított helyzete nem változik, az egymást követő mérésekben az egész elektródarendszert a szelvény mentén, egyenlő lépésekben áttelepítjük. Ekkor nem több réteghatár mélységének és a rétegek fajlagos ellenállásainak a meghatározására törekszünk, csupán egyetlen réteghatár mélységváltozásait próbáljuk követni. Jól választott elektróda-távolságokkal a látszólagos fajlagos ellenállás értékéből erre általában következtetni lehet. Mivel csaknem mindig a felső réteghatár a kisebb ellenállású, a látszólagos fajlagos ellenállás csökkenése azt jelzi, hogy a felső réteg kivastagodott, míg a látszólagos fajlagos ellenállás növekedése a felső réteg vékonyodására utal. Természetesen részletesebb képet kapunk, ha több különböző áramot bevezető elektróda-távolsággal is végigmérjük a szelvényt. A mérésekből – bár csak közelítőleg – ekkor is meghatározhatjuk a fajlagos ellenállást a szelvény mentén, a mélység függvényében, azaz szintén fajlagosellenállás-szelvényt számíthatunk.

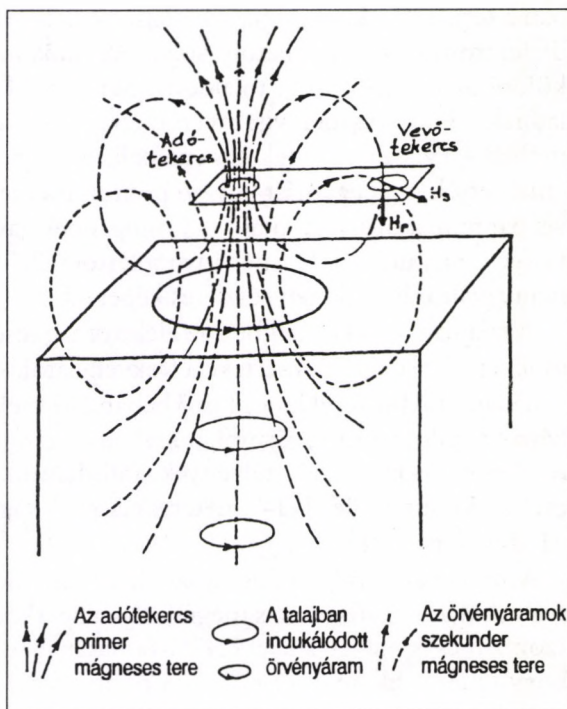
### *Elektromágneses ellenállásmérések*

A módszer az indukció jelenségén alapul. Az adó tekercsben folyó nagyfrekvenciás, néhány kHz és néhányszor 10 kHz közötti periódusú váltóáram ugyancsak periodikusan változó mágneses teret hoz létre. Ezt elsődleges mágneses térnek nevezhetjük. Az időben szintén periodikusan változó elsődleges mágneses tér a talajban örvényáramokat indukál. Az örvényáramok következtében pedig másodlagos mágneses tér alakul ki. Ezt észleljük a vevőtekercssel. Az örvényáramok intenzitása és így a másodlagos tér erőssége az általában használt frekvenciákon szinte kizárólag a talaj fajlagos ellenállásától függ. A vevőtekercs természetesen a teljes teret érzékeli, ami az elsődleges és a másodlagos mágneses tér összege, de az első pontosan számítható és az összegből levonható. A számítási folyamat végén ismét megkapjuk a talaj fajlagos ellenállását.

Egy lehetséges mérési elrendezést a 6. ábra mutat be, melyben mindkét tekercs vízszintes. Az elsődleges mágneses tér erővonalait hosszabb szaggatott vonallal, az örvényáramok keltette másodlagos mágneses tér erővonalait rövidebb szaggatott vonallal ábrázoltuk. A tekercsek távolsága néhány méter.

A frekvencia változtatásával és kisebb mértékben a tekercsek magasságának módosításával néhány kísérlettel beállítható az a mélységtartomány, melynek

valódi fajlagos ellenállása a legnagyobb járulékot adja a számított látszólagos fajlagos ellenállására. Vízszintes síkban elhelyezett tekercsek esetén a legnagyobb a felszín közvetlen környezetének hatása, és ez a felszíntől mért távolsággal gyorsan csökken. A néhány méter mélységű rétegek fajlagos ellenállása a meghatározott értéket már alig befolyásolja. Vertikálisan elhelyezett tekercseknél a felszíni ellenállás hatása zérus, és a maximális hatást általában az 1-2 méter közötti mélységre állítják be. Természetesen az ennél nagyobb mélységű rétegek ellenállása is hat a kapott értékre, csak kisebb mértékben. Nagy előnye a módszernek, hogy elektródákat nem kell a földbe helyezni, emiatt a mérés igen gyors, rövid idő alatt sok ponton mérhetünk, és a hálózatban mért adatokból könnyen szerkeszthetünk térképet. Megjegyezzük, hogy indukciós elven működnek a különböző fémkereső eszközök is, de ezek behatolási mélysége olyan kicsiny, hogy csak speciális, felszín közeli fém-tárgyak megtalálásában lehetnek hasznosak, környezeti geofizikai alkalmazásuk erősen korlátozott.



6. ábra. A váltóáramú mérés lényege: az adótekercsben folyó váltóáram mágneses teret kelt, ez a talajban örvényáramokat indukál, melynek terét a vevőtekercssel észleljük. Az elsődleges mágneses tér erővonalait hosszabb szaggatott vonal, az örvényáramok keltette másodlagos mágneses tér erővonalait rövidebb szaggatott vonal ábrázolja

### Földradar-mérések

Az indukciós szelvényezéshez hasonlóan a földradar is elektromágneses módszer, azonban jóval nagyobb, 100 MHz és 1 GHz közötti frekvenciájú, jól fókuszált elektromágneses hullámokat használ. Ebben a frekvenciatartomány-

ban a terjedést a közeg fajlagos ellenállásánál már jóval nagyobb mértékben a dielektromos állandó befolyásolja. Az adóantenna által kibocsátott jelek a különböző dielektromos tulajdonságú rétegek határain nagyobb részben áthaladnak, kisebb részben visszaverődnek. A vevőantenna – számos más hullám mellett – a visszavert jeleket is érzékeli, és megfelelő feldolgozással ezeket ki is emelhetjük. Sok egymást követő ponton mérve és egymás mellé felrajzolva a vevőantennából nyert, majd számítógéppel javított jelsorozatot, olyan szelvényt kaphatunk, mely a néhány métertől néhányszor tíz méter mélységartomány változásairól igen részletes képet ad.

A talajban és a kőzetekben az elektromágneses hullámok energiája gyorsan csökken. A csökkenés mértéke a frekvenciától is függ, emiatt különböző frekvenciájú hullámokkal különböző behatolási mélységű szelvények készíthetők. Mivel a kibocsátott sugárnyaláb keskeny, igen jó felbontóképességű, a finom részleteket is kimutató szelvényeket állíthatunk elő, melyeken a réteghatárok mellett kis kiterjedésű (1-2 méteres) tárgyak vagy épületmaradványok, üregek stb. is láthatóvá tehetők.

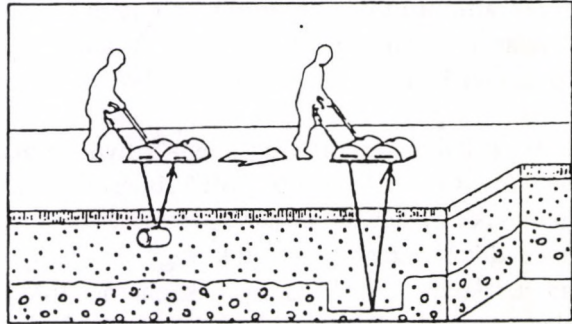
Mindkét antennát földön húzott kis kocsin helyezik el, a műszer digitálisan regisztrálja és grafikusán is megrajzolja a beérkező hullámok képét. Ez utóbbit azonban csak előzetes tájékozódásra használják, lényegében ezzel ellenőrzik, hogy a mérés sikeres volt-e. Az egy ponton végzett mérés egyetlen, ún. csatornát ad, mely az elektromágneses hullámoknak megfelelő rezgés képe.

3. táblázat

*Elektromágneses hullámok terjedésére jellemző adatok néhány, a gyakorlat számára fontos anyagban*

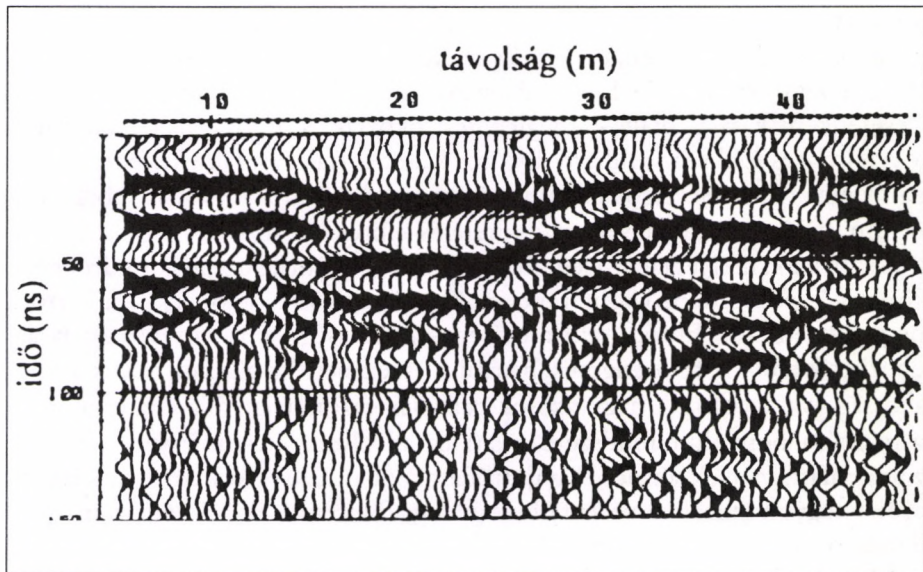
Anyag	Dielektromos állandó ( $\epsilon$ )	Elnyelés (dB/m)	Terjedési sebesség ( $10^8$ m/s)
Levegő	1	0,00	30,00
Víz	81	0,18	3,30
Sós víz	81	320	3,30
Száraz homok	3	0,14	15–20
Vízzel telített homok	25	2,30	5,00
Agyag (száraz)	3	0,28	9,00
Agyag (nedves)	15	20,00	9–10
Aleurit (nedves)	7	45,00	11,00
Homokkő (nedves)	6	24,00	12,00

A rezgést az idő függvényeként regisztráljuk, a mélységet a sebesség ismeretében lehet (később) számítani. Néhány anyag (kőzet, talaj) földradar-mérés szempontjából fontos jellemzőit a 3. táblázat foglalja össze. Rendszerint vonal mentén mérünk, nagyon sok egymást követő ponton. A végeredmény a sok egymás mellé felrajzolt csatornából álló szelvény, mely bonyolult, soklépéses, számítógépes feldolgozás eredménye.



7. ábra. A földradar-módszer mérési elrendezése

A mérést vázlatosan a 7. ábra mutatja be, a 8. ábra pedig egy földradar-szelvényt. A függőleges tengelyen változóként már a számítással kapott mélység szerepel. Az egyes csatornák olyan sűrűn követik egymást, hogy egymástól szinte meg sem különböztethetők. Jól látszik azonban, hol nagyobbak a rez-



8. ábra. Földradar-szelvény. Az egymás mellé felrajzolt csatornák kirajzolják a reflektáló felületek képét. A szóró- (diffraktáló-) pontok diffrakciós hiperboláik alapján ismerhetők fel

gések amplitúdói. Ezek szinte kirajzolják az elektromágneses hullámokat visszaverő határok mélybeli képét. Amikor a visszaverő tárgy mérete kicsiny (pontszerű), a szelvényen az optikából jól ismert diffrakciós görbék jelennek meg.

Ezek lefelé – a mélység felé – kinyíló hiperbolák, csúcsuk mélységében helyezkedik el a hullámok szóródásáért felelős tárgy. A földradar-szelvények nemcsak egy-két réteghatár követésére, de a méter nagyságrendbe eső, környezetüktől eltérő alakulatok vagy építménymaradványok, esetleg tárgyak megtalálására is alkalmas. Ilyenek lehetnek föld alatti járatok, pincék, folyosók, elég nagy méretű csövek, hordók, tartályok stb. Megjegyzendő, hogy amikor túlságosan sok visszaverő felület vagy a hullámokat szóró pont van, a kép áttekinthetlenné válhat.

### *A földrengés-veszélyeztetettség meghatározása*

A földrengés-veszélyeztetettség tudományos igényű meghatározása az utóbbi évtized vizsgálatain alapszik. Ez az összetett, nehéz feladat jó példa arra, hogy eredmény csak több tudományterület közös erőfeszítésétől, jó együttműködésétől várható. Ezek között a környezeti geofizika is számos vizsgálatban kap szerepet.

Napjainkban a földrengés-veszélyeztetettséget másként ítélik meg, mint akár egy vagy két évtizede. Ennek alapvető oka az, hogy a földrengések igen sok – esetenként katasztrofális – meglepetést okoztak, számos halálos áldozatot követeltek, és többszáz milliárd dolláros kárt okoztak, annak ellenére, hogy a leginkább érintett országok hatalmas összegeket költöttek kutatásra, obszervatóriumi hálózatok kiépítésére és földrengés-előrejelzésre.

A másik ok, melyet talán a legjobban az Európa Tanács az egyik földrengés-előrejelzéssel foglalkozó konferencián (Strasburg, 1991. október) fogalmazott meg, a következő: „Európa sebezhetősége – a lakosság, a környezet és gazdaság sebezhetősége – a földrengések hatásaival szemben kritikusan növekszik, a lakosság gyarapodása, a nagyvárosok talajának bizonytalan állapota és az infrastruktúra bonyolult rendszere miatt és az olyan létesítmények növekvő száma miatt, melyek sérülése katasztrófát okozhat. Ezen okok miatt sok lakott terület nagyon sebezhetővé vált olyan gyenge földrengések számára is, melyek nem okoztak károkat a múltban.”

A károk jelentős csökkentése érhető el a biztonsági előírások betartásával, melyek között vannak állandóak, mint a megfelelő biztonságú építésre vonatkozók, vagy időlegesek, melyeket hosszú távú (néhány évtized) vagy rövid távú (néhány hét vagy kevesebb) előrejelzés esetén léptetnek életbe.

A földrengések előrejelzése (hosszú távú és rövid távú egyaránt) korlátozott pontosságú és megbízhatóságú. Ennek ellenére a károk jelentős része elkerülhető, ha megfelelő biztonsági intézkedéseket léptetünk életbe.

Az elmúlt évtizedekben készített és néhol – sajnálatos módon, az előbb idézett figyelmeztetés ellenére – még ma is pontosnak tekintett szeizmikusveszélyeztetettség-térképek alapvető hibája az, hogy a rendelkezésre álló megfigyelési anyagot elegendő mintának tekintik. Ez csak akkor igaz, ha a földrengéseket generáló tektonikai folyamatok időskálája rövidebb, mint a regisztrált földrengés-történelem. Csak a leggyorsabban mozgó kőzetlemezek határain, például Japánban rövidebb a földrengések visszatérési intervalluma, mint a történelmi feljegyzések hossza. Még az Egyesült Államok nyugati partvidékén húzódó Szent András-törésvonal esetében sem elegendő a mintegy 200 éves megfigyelési időtartomány a nagy rengések visszatérési periódusának megállapításához. Kelet felé mozogva ettől a nevezetes törésvonaltól a kéregdeformációk egyre lassúbbak, és a visszatérési intervallum is egyre hosszabb, valószínűleg néhány ezer év, majd a keleti partvidéken már százezer év vagy annál is több. A nagy rengések visszatérési periódusát a felszín közeli törésvonalakat keresztező feltárások részletes geológiai vizsgálatával, a rengések után megszakadó és elmozduló rétegek korának megállapításával becsülték meg.

A kis és közepes szeizmikus aktivitású országokban pusztán a történeti feljegyzések és statisztikák alapján egyszerűen nem lehet felelősséggel megállapítani a veszélyeztetettséget. Néhány ország mégsem akarja két évtizedes térképeit javítani, ugyanis akkor felül kellene vizsgálni a régebben hozott döntéseket, és le kellene vonni a sérülékeny létesítmények valódi veszélyeztetettségéből fakadó konzekvenciákat. Egyszerűbb reménykedni abban, hogy a döntéshozók számára belátható rövid időtartamban mégsem lesz nagy földrengés. Természetesen ennek is van bizonyos valószínűsége. Amikor azonban a remény szertefoszlik egy nagy, pusztító rengés miatt, a kár óriási, a közönség válasza drámai és kiszámíthatatlan lesz. Igen nagy emiatt a földtudományok ismerőinek a felelőssége, akik tudják, hogy a Föld folyamatai az emberi léptéktől különböző skálán mérendők, és ezen a skálán az emberi történelem egy pillanat. A felelősség mellett elegendő bátorságra is szükségünk van, mert ki kell mondani – akkor is, ha ez a többségnek nem tetszik –, hogy számos mérnöki döntést felül kell vizsgálni, mert azok hibásak és megalapozatlanok voltak, számos létesítményt be kell zárni vagy meg kell erősíteni, továbbiak építését pedig abba kell hagyni.

A földrengések hatását két, lényegesen különböző skálával mérik. A helyi megrázottságot adja meg az intenzitás, a felszabaduló energia logaritmusával arányos a magnitúdó. Ez utóbbit a skálát elsőként javasló szeizmológus tiszte-

letére Richter-skálának nevezik. Az intenzitásskála 12 fokozatú, a Richter-skála „nyitott” abban az értelemben, hogy nincsen felső határa. Bevezetése óta azonban nem tapasztaltak (kerekítve) 9 magnitúdónál nagyobb rengéseket.

A magnitúdó egyetlen számmal jellemzi a földrengést, az intenzitás jelentősen változik, attól függően, milyen távol vagyunk a rengés epicentrumától (a legjobban megrázott helytől). De lényeges a földrengés fészekmélysége is. Mély fészekű rengés epicentrumában nem nagy az intenzitás – még akkor sem, ha a rengés magnitúdója egyébként nagy. A magnitúdó, fészekmélység és az epicentrumban kialakuló lehetséges intenzitások közötti kapcsolatot – néhány számunkra érdekes esetre – a 4. táblázatban foglaljuk össze Runcorn, 1967 nyomán:

4. táblázat

*Különböző magnitúdójú és fészekmélységű rengések lehetséges maximális (epicentrális) intenzitása*

Fészekmélység (km):	5	15	45
magnitúdó			
7,5 és 8,5 között		10-nél nagyobb	9–10
6,5 és 7,5 között	10-nél nagyobb	9–10	7–8
5,5 és 6,5 között	9–10	7–8	5–7
4,5 és 5,5 között	7–8	5–7	kisebb, mint 5

A Magyarországon lehetséges rengésekre a táblázat utolsó két sora vonatkozik. A fészekmélységtől függően maximális intenzitásuk az 5 (vagy annál is kisebb) értéktől a 9, esetleg 10 fokig terjed.

A felszabaduló energia nagyságát néhány összehasonlítással érzékeltetjük. Az 1 tonna TNT ekvivalens robbanóanyag robbantásakor felszabaduló energia nagyjából 4,4 magnitúdójú rengésnek felel meg, míg egy 20 kilotonnás atomtöltet felszabaduló energiája egy mintegy 6,5 magnitúdójú rengés energiájával azonos. Magyarország évi teljes energiaszükségletét fedezné – ha hasznosítani lehetne – egyetlen 8–8,5 közötti magnitúdójú rengés energiája.

A magnitúdók statisztikus feldolgozása alapján megállapítható volt, hogy a nagy rengések sokkal ritkábbak, a kisebb magnitúdójúak sokkal gyakoribbak. Eléggő jó közelítés a logaritmikus kapcsolat, a gyakoriság logaritmus a magnitúdóval lineárisan csökken.

Fontos megfigyelés, hogy még aszeizmikus területen is vannak nagy rengések – akár 8 vagy annál nagyobb magnitúdójú rengések is –, csak sokkal ritkábban. A teljes Földre vonatkozó gyakoriság adatok szerepelnek az 5. táblázatban,



ahol a magnitúdó mellett a felszabaduló energiát és a rengés hatását is megadjuk. A hatás sekély rengésre és az epicentrum közvetlen környezetére vonatkozik.

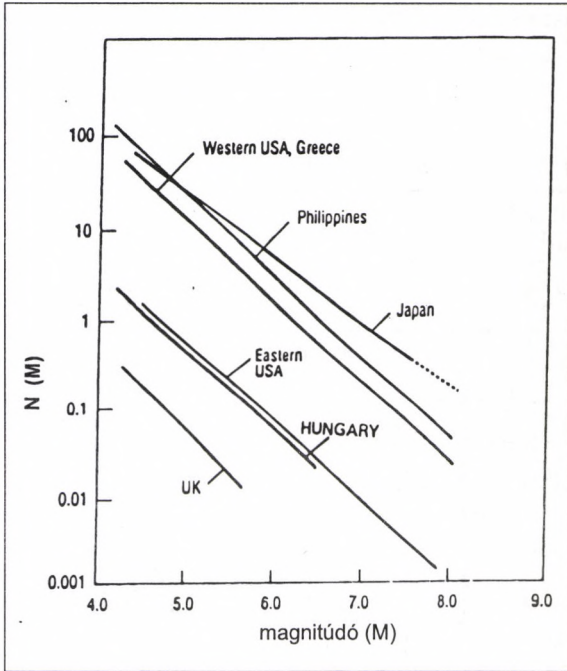
5. táblázat

Különböző magnitúdójú rengések száma, energiája, hatása

Magnitúdó	Rengések száma (éves átlag)	Energia (Joule)	Hatás
nagyobb, mint 8	0,1–0,2	nagyobb, mint $10^{18}$	katasztrófális károk
nagyobb, mint 7,4	4	nagyobb, mint $4 \cdot 10^{15}$	nagy károk
7,0–7,3	15	$(0,4–2) \cdot 10^{14}$	jelentős károk
6,2–6,9	100	$(0,5–23) \cdot 10^{13}$	jelentős épületkárok
5,5–6,1	500	$(1,0–27) \cdot 10^{12}$	kisebb épületkárok
4,9–5,4	1 400	$(3,6–57) \cdot 10^{10}$	mindenki érzi
4,3–4,8	4 800	$(1,3–27) \cdot 10^9$	sokan érzik
3,5–4,2	30 000	$(1,6–76) \cdot 10^8$	néhányan érzik
2,0–3,4	800 000	kisebb, mint $10^7$	csak műszerrel érzékelhető

Kisebb területekre vonatkozó részletesebb vizsgálatokat összegez a 9. ábra, mely Magyarországot néhány jellegzetes területtel hasonlítja össze. Az egymillió négyzetkilométer nagyságú területen egy év alatt tapasztalt, adott magnitúdónál nagyobb magnitúdójú rengések számának logaritmusát ábrázolja a magnitúdó függvényében. Látszik, hogy a hazai földrengés-tevékenység jóval kisebb, mint Japáné vagy akár az Egyesült Államok nyugati területeié, sokkal nagyobb azonban, mint Nagy-Britanniáé, és nagyjából az Egyesült Államok keleti területeinek aktivitásával egyezik meg. Az ábráról például leolvasható, hogy Magyarországon a 4,5 (vagy annál nagyobb) magnitúdójú rengések körülbelül olyan gyakoriak, mint Japánban a 7 (vagy annál nagyobb) magnitúdójúak. A nagy rengések mindenütt sokkal ritkábbak.

A viszonylag nagyobb (4,0-nél nagyobb magnitúdójú), 1880–1991 között kipattant rengések területi eloszlását Magyarországon és tágabb környezetében a 10. ábra mutatja be. A teljes országra vonatkozó intenzitás ( $I_0$ ) és gyakoriság (N) közötti kapcsolat az MTA Szeizmológiai Observatóriuma szerint az utóbbi, valamivel több mint 100 év megfigyelési anyagának alapján:



9. ábra. Az egymillió négyzetkilométer nagyságú területen egy év alatt tapasztalt, adott magnitúdónál nagyobb magnitúdójú rengések számának logaritmus a magnitúdó függvényében. A kapcsolat azt fejezi ki, hogy a nagy rengések sokkal ritkábbak, de egyes területek között jelentős különbségek vannak

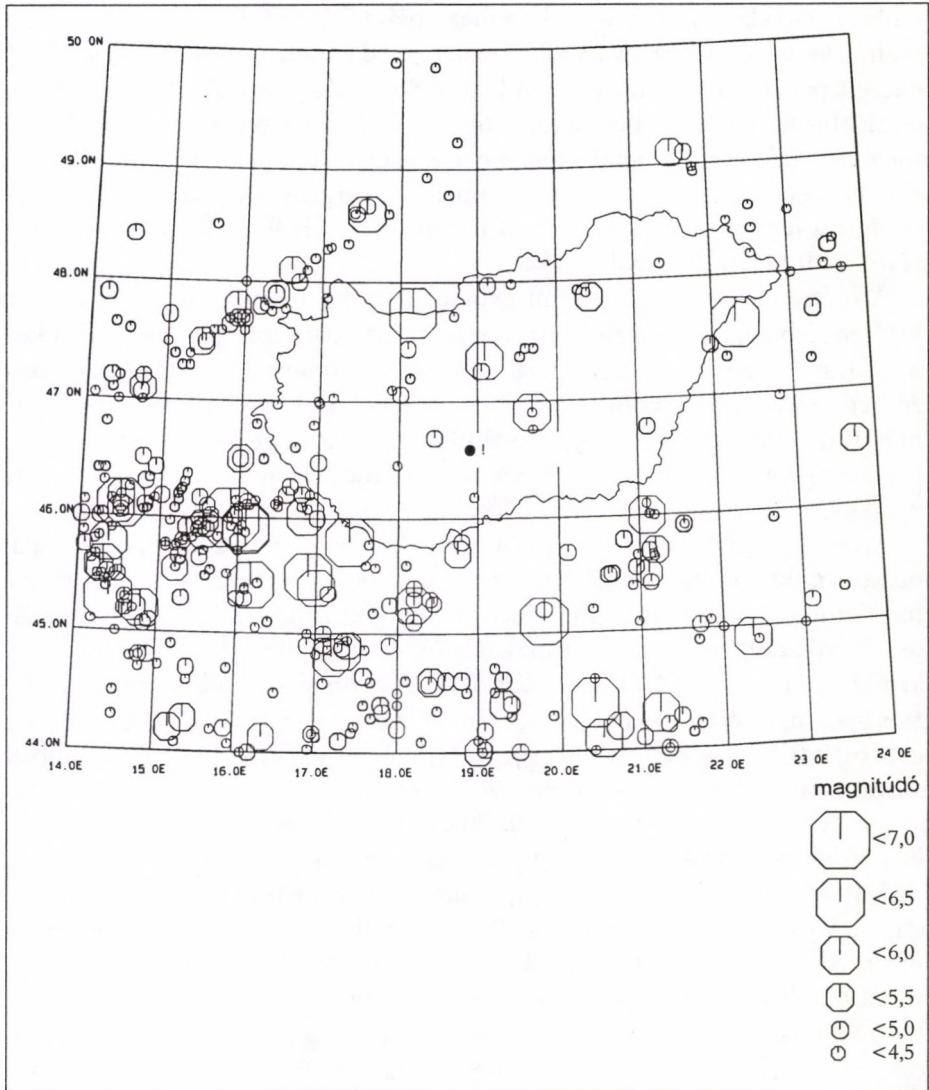
azt is, mekkora energia szabadul fel egy adott időszakban a magnitúdó függvényében. Az eredmény azt mutatja, hogy az energia-felszabadulásban a nagy rengések szerepe a döntő.

Annak ellenére, hogy rendkívül sok kis magnitúdójú rengés van, ezek összesített energiája messze elmarad a néhány nagy rengés kipattanásakor felszabaduló energiától. A teljes Földet tekintve, a 8-nál nagyobb magnitúdójú rengések a teljes felszabaduló energia mintegy 50%-át adják, a 6-nál nagyobb magnitúdójú rengések pedig már a teljes energia 90%-át. Ez egyértelműen bizonyítja, hogy a tektonikai mozgások során felhalmozódó feszültség nem oldódhat ki sok kis rengéssel. Nem lehet megelőzni a „nagy” rengést azzal, hogy valamilyen módszerrel (például robbantásokkal) sok kis rengés gerjesztésére törekszünk.

$$\log N = 1,73 - 0,42 I_0.$$

(Az első együttható hibája 0,12, a másodiké 0,02.) A képletből kitűnik, hogy 4° intenzitású rengésre minden évben kell számítani, 6° intenzitású rengés nagyjából évtizedenként egy, esetleg kétfő fordul elő, 8° epicentrális intenzitású rengés egy évszázadban nagyjából kétszer pattanhat ki, végül a 9° intenzitású rengések között átlagosan több mint egy évszázad idő is eltelhet. A kapcsolat statisztikus jellegű, és csak azokra az intenzitásokra megbízható, amelyeket a kapcsolat levezetésénél ténylegesen felhasználtak.

A magnitúdó és a felszabaduló energia kapcsolatát megadó képletet a magnitúdó-gyakoriság kapcsolatba beírva, megkaphatjuk



10. ábra. A 4,0-nél nagyobb magnitúdójú, 1880–1991 között kipattant rengések területi eloszlása Magyarországon és tágabb környezetében

Az egy év alatt felszabaduló teljes energia  $10^{18}$  és  $10^{19}$  Joule közé esik. Nem azonos az egymást követő években, de ingadozása nem is túlságosan nagy. Ez azt mutatja, hogy a Föld egészét tekintve a feszültség felhalmozódása és kioldódása rengésekben nagyjából stacionárius. Az energiafelszabadulás – bár

emberi léptékkal mérve nagyak tűnhet – más földtani folyamatok energiaáramához képest elég kicsiny. A földi hőáram által a mélyből a felszínre szállított energia például három nagyságrenddel nagyobb. Az energiák összehasonlítása legalábbis nem mond ellent annak, hogy a földrengés-tevékenységet a hőtermelés és a hatására létrejövő lemezmozgások kísérőjelenségének tekinthessük. A lemezeket mozgó konvekciós áramlások energiaigényei mellett bőven jut energia a lemezek peremterületein feszültségek felhalmozására, melyek egy része földrengésekben oldódik ki.

A mérnöki tervezés a felszíni gyorsulást tudja a legjobban hasznosítani földrengésbiztos szerkezetek létrehozására. Minden építménynek állva kell maradnia a normál gravitációs térben – azaz ki kell bírnia saját súlyát. A tervezésben rendszerint, bizonyos ráhagyással, ennél nagyobb terhelés elviselésére méretezik. Emiatt a földrengéshullámok vertikális (függőleges irányba eső) összetevőjének hatása – eltekintve a különlegesen nagy rengésektől – nem kritikus.

A vertikális irányú gyorsulásokat az építmények még akkor is károsodás nélkül viselik, ha a potenciális földrengések hatását a tervezésnél nem vették figyelembe. Annál fontosabb a horizontális (vízszintes síkba eső) gyorsulás-összetevő számításba vétele. Tapasztalatok szerint a vízszintes gyorsulás egy kritikus érték felett jelentős károkat okoz. A gyorsulást rendszerint a gravitációs gyorsulás törtrészeként adjuk meg. Például  $1 \text{ ms}^{-2}$  gyorsulás  $0,1 \text{ g}$ ,  $2 \text{ ms}^{-2}$  gyorsulás  $0,2 \text{ g}$  stb. Lényeges a gyorsulás csúcserőértéke is, de még fontosabb az az időtartam, amely alatt – mindvégig – nagy a gyorsulás. Ennek meghatározásához rendszerint a  $0,05$  küszöbértéket használják, és azt adják meg, milyen hosszú időtartamban nagyobb a gyorsulás a küszöbértéknél.

Alapvető tapasztalat, hogy szilárd talajon, néhányszor tíz kilométer távolságban kipattant, mérsékelten nagy (5 és 7 közötti magnitúdójú) földrengésre a maximális gyorsulás  $0,05 \text{ g}$  és  $0,35 \text{ g}$  közé esik. Néhány esetben a nagyfrekvenciás hullámok meglepően nagy gyorsulásokat is létrehozhatnak. Például a Bear Valley-i (Kalifornia), 1972. szeptember 4-i rengés, melynek magnitúdója csak  $4,5$  volt, vagy az 1972. június 21-i anconai (Olaszország) rengés, melynek magnitúdója  $4,7$  volt, egyaránt  $0,6 \text{ g}$ -nél nagyobb horizontális gyorsulásokat okoztak néhány kilométeres észlelési távolságokban. Ugyancsak általános tapasztalat, hogy a vertikális irányú gyorsulás maximuma mintegy fele a horizontális irányú gyorsulásnak.

Végül igen lényeges megfigyelés, hogy egy földrengés hullámainak laza talajon mért gyorsulása jelentősen nagyobb, mint ugyanazon földrengés hullámainak ugyanakkora távolságban, de a kemény kőzeten mérhető gyorsulása. A különböző rugalmas paraméterű rétegek vagy rétegsorok átviteli tulajdonsá-

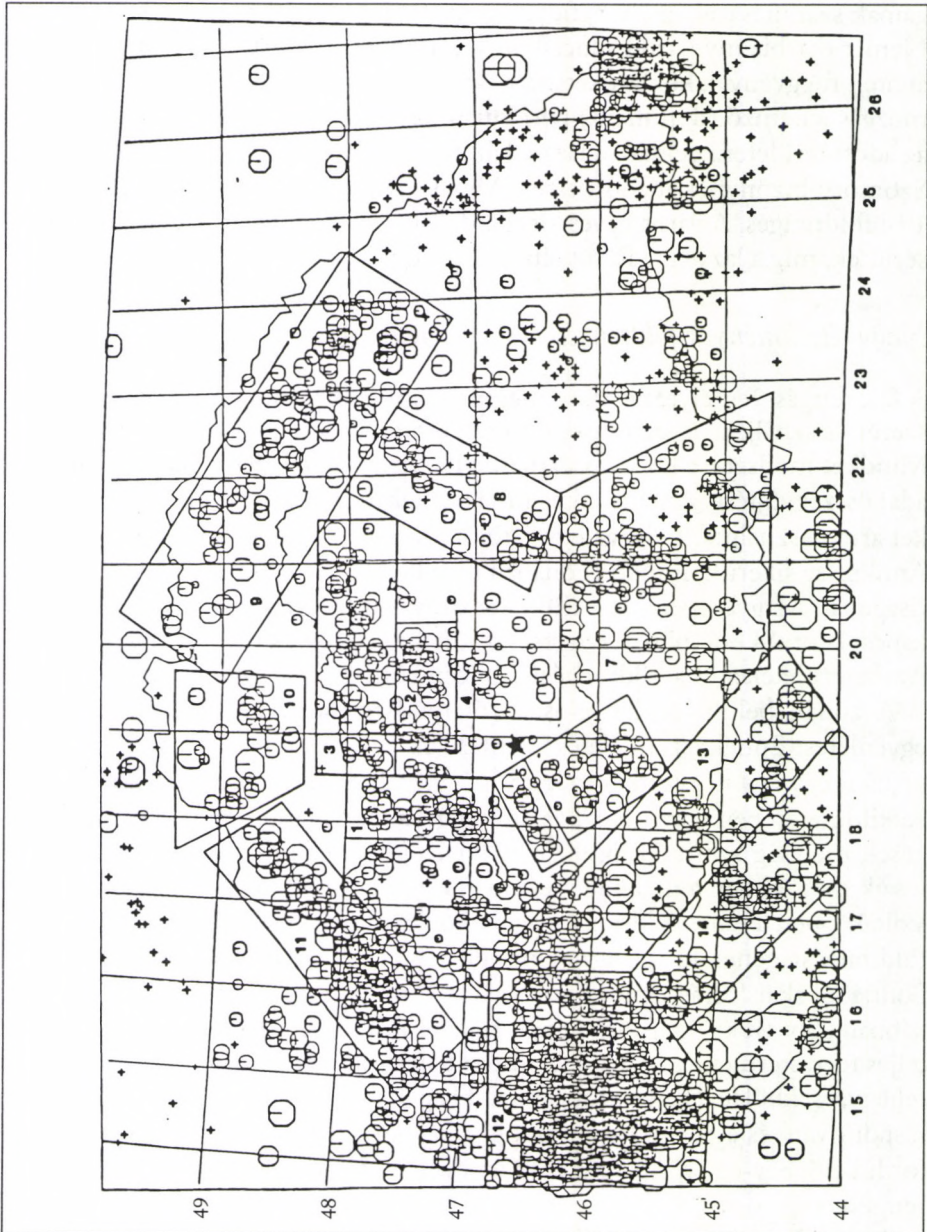
gainak számításával ez a megfigyelés magyarázható, illetve előre is jelezhető. Nem ritka bizonyos frekvenciákon a különböző típusú rétegekre jellemző átviteli függvények közötti kétszeres vagy még nagyobb szorzó. Ha ez a talajmozgás jellemző (domináns) periódusú összetevőire is érvényes, a rezgések az adott területen, például a laza talajrétegek felszínén mintegy felerősödnek. Szomorú bizonyítékot adott erre a Mexikóváros környéki, 1985. szeptember 19-i földrengés. A város egyes – szilárd alapozásra épült – részei mérsékelten sérültek, míg a laza talaj fölötti épületek szinte teljesen elpusztultak.

### *Nagy létesítmények földrengés-veszélyeztetettsége*

A földrengés-veszélyeztetettség meghatározásának jelenleg két alapvető módszerét használják: a statisztikus módszert és a determinisztikus módszert. Mindkét módszerre közös valamennyi szeizmológiai, geológiai és geofizikai adat összegyűjtése. A statisztikus módszer alkalmazásakor ezeket az ismereteket arra használjuk, hogy az egyes földrengés-generáló zónákat elkülönítsük. Amikor ez sikerült, minden zónában meg kell határoznunk a jellemző gyakoriságokat. Magyarországon belül a maximális intenzitás és gyakoriság közötti kapcsolatot 14 különböző rengéses területre határozták meg (Zsíros T., 1991). A részterületeket és a földrengések epicentrumait a 11. ábra mutatja be.

A zónán belüli területi eloszlásról rendszerint azt tételezzük fel, hogy egyenletes. Ennek szemléletes jelentése az, hogy minden kis részterületen – például egy egy négyzetkilométeres négyzetekre bontott zóna minden négyzetkilométerében – azonos valószínűséggel pattan ki földrengés. Elvileg a rengések mélység szerinti eloszlását is figyelembe vehetjük, de ezt igen ritkán teszik meg, éppen a mélység szerinti eloszlás pontos ismeretének hiányában. Voltaképpen a teljes földrengés-generáló zónát helyettesítjük nagyon sok kis, földrengést generáló térfogatelemmel, melyek a további vizsgálatok szempontjából akár forráspontoknak is tekinthetők. Egy-egy forráspont sokkal ritkábban „bocsát ki” magából rengéshullámokat, mint a forrásterület, hiszen a teljes forrásterület – az összes forráspont – együtt adta a történeti és műszeres feljegyzésekből levezetett statisztikát. Ha például felosztásunkban 10 ezer forráspont van, és egy 4,0 magnitúdójú rengés a teljes zónában évente egyszer fordul elő, egy-egy forrás csak 10 ezer évenként generál egy 4,0 magnitúdójú rengést.

A következő lépés a vizsgált pontban a megrázottság statisztikájának számítása a zónában generált földrengések hatására. Ehhez egy további lényeges hatást is figyelembe kell vennünk: a földrengéshullámok gyengülését a megtett út során. Mivel a felosztás forráspontjai különböző távolságban vannak a



11. ábra. A statisztikus földrengés-veszélyeztetettség meghatározásához használt forrásterületek és a földrengések epicentrumai.  
A körök nagysága a maximális intenzitásra utal (Zsíros T., 1990 nyomán)

vizsgált ponttól, a gyengülés mértéke is különböző lesz. Szigorúan véve a vizsgált pont és a forráspont közötti geológiai felépítést is figyelembe kellene venni, de rendszerint megelégszünk egy átlagos csökkenési együtthatóval, esetleg a területen belül is valamilyen egyszerű függvény szerint lassan változó csökkenési együtthatóval.

Amikor a felosztásokat valamennyi forrásterületre elkészítettük, és a gyengülési együtthatókat összegyűjtöttük, elegendő adatunk van a vizsgált pont megrázottságának statisztikus vizsgálatára. Az összes lehetséges forráspont távolságait és gyakoriságait használva megvizsgáljuk, milyen gyakorisággal (hány évenként) okoznak az adott távolságban adott intenzitású megrázottságot a forráspontban kipattanó rengések. A számítások eredménye egy intenzitás-gyakoriságot megadó adatrendszer.

Ez most már kizárólag a vizsgált pontra vonatkozik, annak lehetséges megrázottságát jellemzi. A gyengülés miatt a nagyobb intenzitásokhoz jóval kisebb gyakoriság tartozik, mint a  $\log N = a - bI_0$  szerinti csökkenésből következő érték. Rendszerint valamilyen kezdeti értéktől, például a  $4^\circ$  intenzitástól  $0,1$  lépésenként felfelé haladva valamilyen felső határig, például  $10^\circ$ -ig számítják ki az adott vagy annál nagyobb intenzitásértékek gyakoriságát. Jelölje ezt az adatsort  $f(I')$ .

Az utolsó lépés valószínűségek meghatározása a gyakoriságból. Mivel a földrengések jó közelítéssel Poisson-eloszlású, ritka események, annak a valószínűsége, hogy  $T$  időtartam alatt  $I_0 < I'$  intenzitást tapasztaltunk:

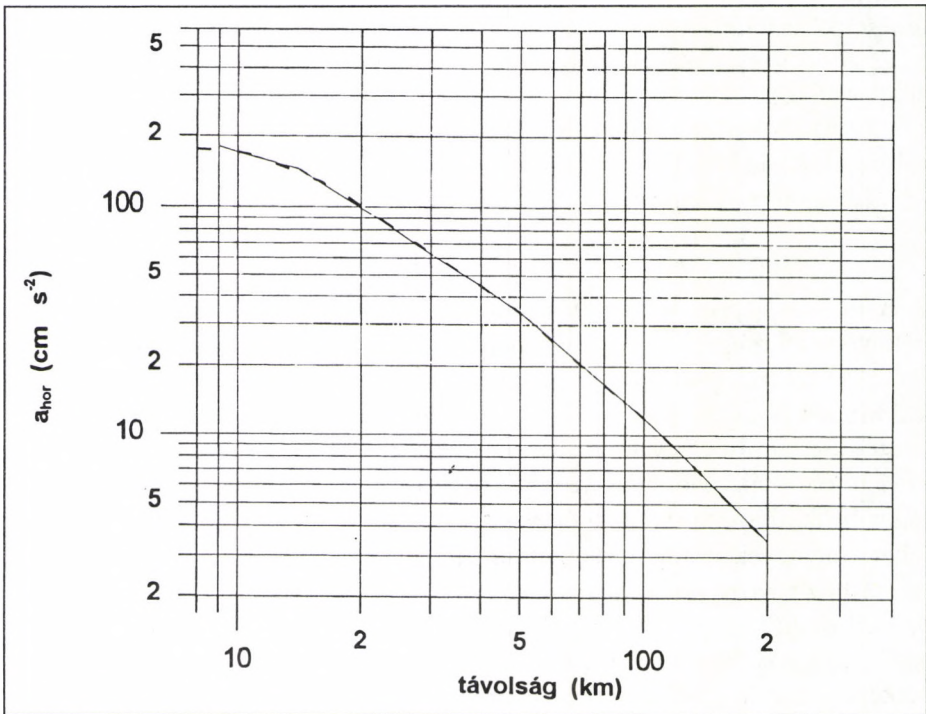
$$P(I_0 < I') = 1 - e^{-f(I')T}$$

A képlet alapján tetszőleges időtartam alatt akármilyen valószínűséggel bekövetkező megrázottság számítható. Különösen fontos és védendő létesítmények földrengés-veszélyeztetettségét az időtartamok és valószínűségek különböző szintjeivel jellemzik. Az építési szabványokban is rendszerint az adott időtartamhoz és valószínűséghez tartozó intenzitás vagy az abból következő horizontális gyorsulás szerepel. Például atomerőművek esetén a biztonságos működésre vonatkozó érték a  $T = 100$  év és a  $0,5$  valószínűségi szint lehet (úgynevezett OBE = operation basis earthquake), míg a biztonságos lezáráshoz tartozó érték meghatározásához a  $T = 10\,000$  évet és ugyancsak a  $0,5$  valószínűségi szintet választhatjuk (úgynevezett SSE = safe shutdown earthquake). Az első adat annak a földrengésnek az intenzitása, melynek bekövetkezése esetén a működésben még semmilyen zavar nem lesz. A második azt adja meg, hogy a működést ugyan abba kell hagyni egy ekkora rengés esetén, de az erőmű biztonságosan lezárható – anélkül, hogy a környezetébe radioaktív anyagok kerülnének ki (IAEA, 1984).

Nagyméretű víztárolók gátjaira lakott területek közelsége esetén rendszerint  $T = 30\,000$  évet írnak elő (ICOLD, 1987). Még hosszabb időtartamra kell számításokat végezni nagy aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésekor, hiszen az anyagot több százezer évig kell biztonságosan elszigetelni környezetétől.

A determinisztikus módszer közvetlenül a telephelyen becsüli meg a megrázottságot vagy az adott helyen várható legnagyobb gyorsulásokat, illetve a „legrosszabb esetben” kapható akcelerogramot. A helyi geológiai viszonyok ismerete mellett ekkor szükségünk van egy reálisan feltételezhető bemeneti akcelerogramra is.

Az adott helyet érintő lehetséges földrengések távolságát, a földrengés hullámokat gerjesztő felszakadás síkjának adatait, az úgynevezett fészekmechanizmust és a várható legnagyobb rengés magnitúdóját kell figyelembe vennünk. Mivel igen sok és sokféle fészekmechanizmusú, magnitúdójú és távolságú rengés akcelerogramját regisztrálták és tárolják az adatbankokban, rendszerint sikerül kiválasztani néhány bemeneti akcelerogramot, melyek elég jól jellem-



12. ábra. 5,5 magnitúdójú rengés maximális gyorsulásának változása. A folytonos vonal kemény, a vele csaknem pontosan egybeeső szaggatott vonal laza kőzetekre vonatkozik

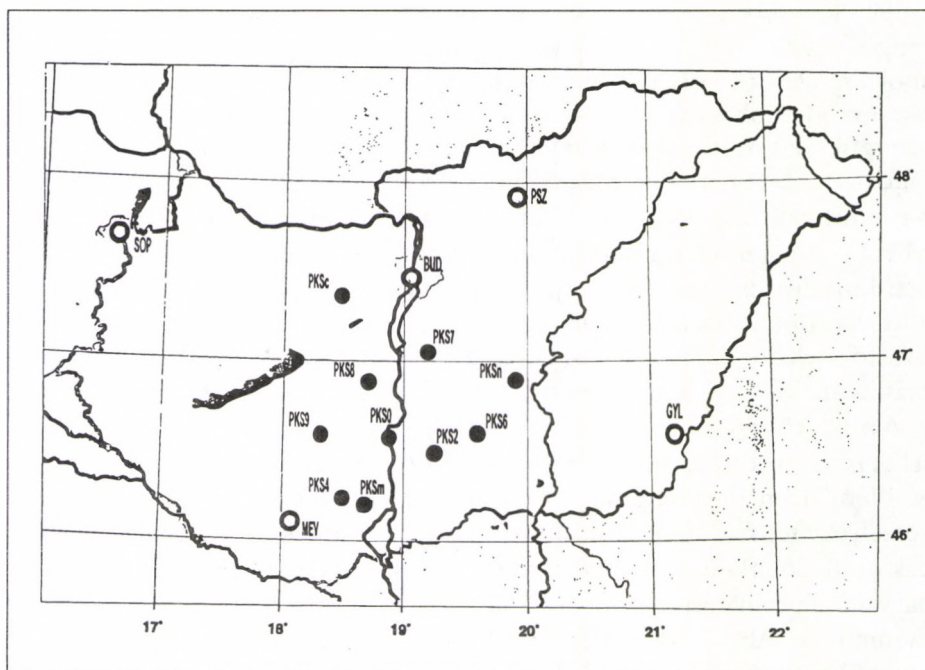


zik a veszélyeztetett létesítmény közelében elhelyezkedő földrengéses területek várható legnagyobb rengéseit. Feltételezve, hogy a szilárd alapkőzeten a gyorsulás az így kiválasztott bemeneti akcelerogram szerint fog változni, a helyi geológiai viszonyok ismeretében az adott helyen kialakuló gyorsulás kiszámítható. A determinisztikus módszer legnagyobb nehézsége éppen a maximális feltételezhető rengés (a nemzetközi szakirodalomban MCE = maximum credible earthquake) kiválasztása. Komoly vita lehet szakemberek között abban, melyik területen és mekkora a maximális feltételezhető rengés. Különösen nehéz a döntés olyan kis és közepes aktivitású területen, ahol a rengések visszatérési periódusa jóval nagyobb, mint a megfigyelés időtartama. Hazánk is ilyen terület, ezért további megfigyelésekre és vizsgálatokra van szükség a maximális feltételezhető rengés magnitúdójának meghatározásához. Az biztosan kimondható, hogy Magyarországon az MCE legalább 6 magnitúdójú, de még nem tudjuk, hogy esetleg 6,5 vagy annál is nagyobb. Mivel 5,5 magnitúdójú rengések dokumentálhatóan voltak, ennek a rengésnek a maximális gyorsulását adjuk meg a távolság függvényében, a szakirodalom alapján (12. ábra). Látható, hogy nincsen lényeges különbség kemény és laza kőzetek között, a folytonos és szaggatott vonallal rajzolt görbék szinte egymásra esnek. Nagyjából 20 kilométer távolságban érjük el a 0,1 g értéket.

A nukleáris erőművek veszélyeztetettsége közismert, és komoly erőfeszítéseket is tesznek a biztonságos működtetésre – többek között Magyarországon is. Nem ilyen megnyugtató a helyzet más nagy létesítmények földrengésveszélyeztetettségével kapcsolatban. Talán a mérnökök számára beláthatatlannak tűnő időtartamok miatt a földrengés-veszélyeztetettséget figyelmen kívül hagyják vagy elhanyagolhatónak vélik. Ettől azonban a veszélyeztetettség nem szűnik meg. Abból, hogy Magyarországon az utóbbi évtizedekben nem volt nagyobb földrengés, nem következik, hogy nem is lehet. A kis rengések mutatják, hogy a tektonikai folyamatok nem álltak le. A geodéziai módszerekkel jól nyomon követhető szintváltozások jelzik egyes területek emelkedését, mások süllyedését. A GPS (Global Positioning System)-mérések egyértelmű horizontális elmozdulásokat mutattak ki. A feszültségmérésekből is világosan kitűnik, hogy Magyarország nem feszültségmentes terület. A nagyobb mélységek viszonyait felderítő szeizmikus mérések sok törésvonalat – tört, zúzott övet – tártak fel, melyek egy része ma is aktív lehet vagy tektonikai aktivitása felújulhat.

A meglévő földrengés-statisztikák pontosításában és a veszélyeztetett létesítmény környezetének vizsgálatában elengedhetetlen a mikroszeizmikus megfigyelő-hálózat. Különös jelentősége van kis-közepes aktivitású területeken, mert elegendő sok és érzékeny műszert telepítve olyan, kis magnitúdójú

rengések is detektálhatók, melyeket a normál szeizmológiai hálózat nem vesz észre. 1995-ben Paks környékén, az erőmű 50 kilométeres körzetében 10 állomást tartalmazó megfigyelő-hálózatot telepítettek, mely április óta a nemzetközi gyakorlat szerint detektálja az eseményeket (13. ábra). A hálózat detektálási küszöb magnitúdóértéke az erőmű 100 km-es környezetében 1,5 és 2 között van, attól függően, hogy kisebb vagy nagyobb zajhátár mellett pattannak-e ki a földrengések.

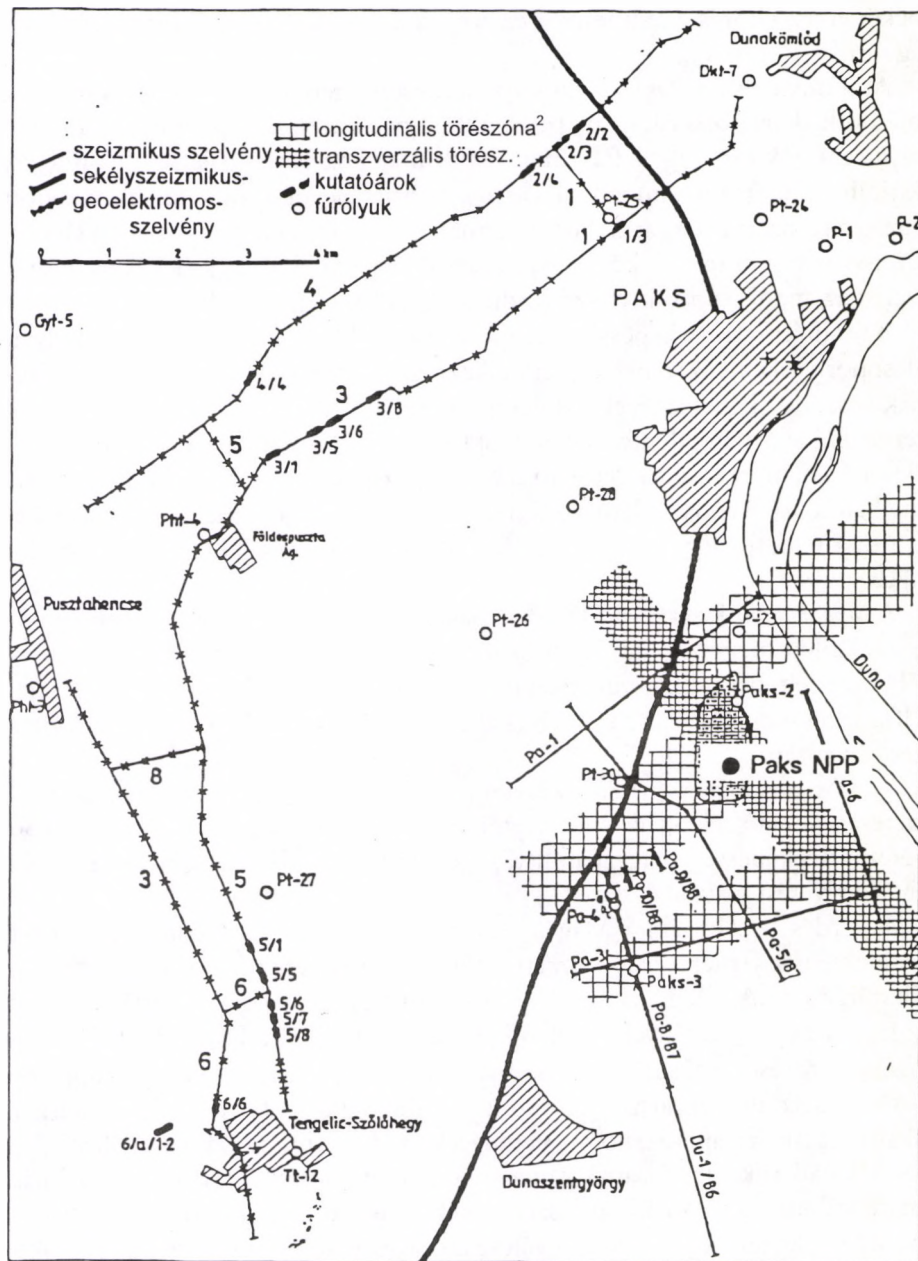


13. ábra. A Paks környékén telepített szeizmológiai megfigyelő-hálózat

### *A felszínig nyúló törésvonal (capable fault) vizsgálata*

A szeizmikus veszélyeztetettség meghatározása során különös figyelemmel kell értékelni a telephely körzetében található vetődéseket. Ebben is segíthet a környezeti geofizika számos módszere. Amennyiben a vetők felszíni térképezését már megoldottuk, még két alapvető kérdést kell megválaszolni.

Az első kérdés az, hogy az észlelt vetők milyen korúak, és fennáll-e a lehetősége annak, hogy a legfiatalabb vetők menti mozgások még nem fejeződtek be. Másképpen fogalmazva: van-e számottevő valószínűsége annak, hogy a vetők a jelenben és a közeli jövőben aktivizálódnak? Mivel a vetődés a rideg kéregben



14. ábra. Elektromos szelvények nyomvonalai Paks környékén. Néhány további mérés nyomvonalát, illetve a törési zónákat is feltűnítettük

bekövetkező törés eredménye, ez az esemény általában földrengéssel jár együtt.

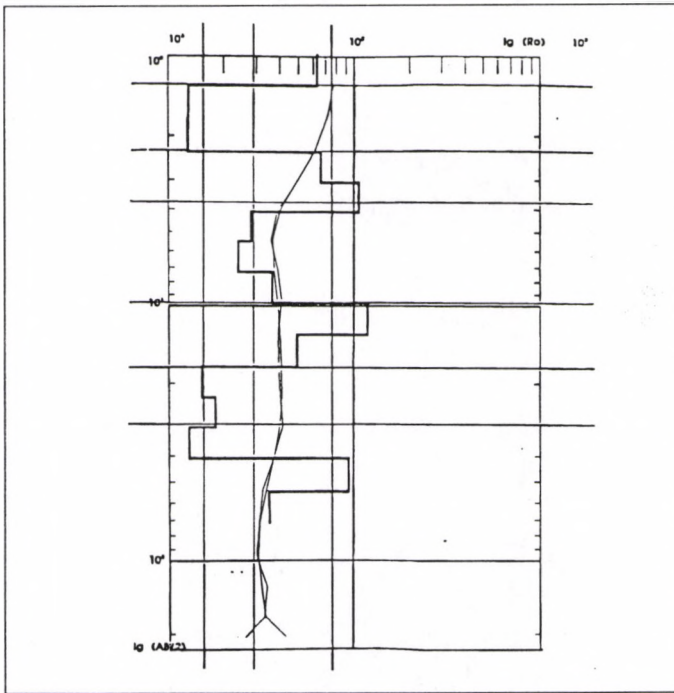
Amennyiben a válasz az aktivitás kérdésére igenlő, akkor lehet feltenni a második alapvető kérdést. Ez pedig az, hogy a létrejövő vetőzóna kiterjedése olyan mértékű-e, hogy a felszínen vagy annak közelében is létrejön a rétegek észlelhető nyírásos elmozdulása. Más szóval: elegendő-e a felhalmozódott energia felszabadulása arra, hogy valamelyik törési sík elérje és ez úton elvesse a felszínt vagy a felszín közeli tartományt? A vetőnek ezt a lehetséges potenciálját az angol „capability” szó fordításával „képesség”-nek hívjuk.

A fentiek szerint a képességgel rendelkező vetők az aktív vetőknek egy olyan alcsoportját képezik, amelyek rendelkeznek a felszíni elnyíródás létrehozásának veszélyes képességével. Értelemszerűen csak aktív vető lehet képességgel rendelkező, értelmetlen vizsgálni inaktív vető képességét. Következik ugyanakkor az is, hogy az aktív vetők másik alcsoportja az, amely nem képes a felszínig hatoló törésvonalak létrehozására, bár működik a jelenben is. Mindezeket pontosan definiálja a Nemzetközi Atomenergia-ügynökség útmutatója (IAEA, 1984).

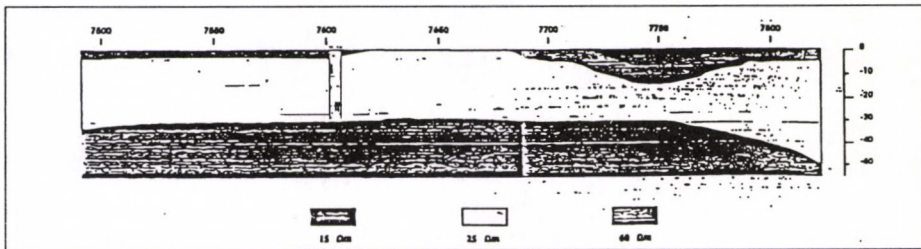
A *capable fault* kizárására először a paksi atomerőmű környezetének geológiáját kellett megvizsgálni, különös tekintettel az erőmű közvetlen környezetében észlelt, pannóniai rétegeket is harántoló vetők korának megállapítására. Elfogadott tény, hogy az aljzatban található vetők közül több is reaktiválódott a neogén során.

Vitatott azonban ezen vetők kvarter kori aktivitásának kérdése, és így természetesen nem tisztázott az ismert vetők mai működésének lehetősége, sőt azon potenciális képességük („capability”) sem volt eleve kizárható, hogy felszínig hatoló elvetést hozzanak létre.

A kérdés tisztázására a Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet geoelektromos méréseket végzett a kvarterkorú rétegek folytonosságának ellenőrzésére. Az ellenállásszelvények nyomvonalát úgy választották ki, hogy az É–D irányú szelvényeken ellenőrizhetőek legyenek a Kapos-vonallal párhuzamos törések, míg az ezekre nagyjából merőleges szelvények képet adjanak a Móri-árok törésrendszerhez tartozó vetődésekről (14. ábra). A módszer alkalmazásának alapja az, hogy a vetődések rendszerint megváltoztatják a fajlagos ellenállások eloszlásának sima, nyugodt menetét, mert az elmozdulás miatt különböző ellenállású kőzetek kerülnek azonos szintre, és a vetősík mentén a kőzet szerkezetének változása, a tört, felmorzsolts zóna nagyobb folyadéktartalma is ellenállás-változást okozhat. A számos szondázási görbe egyikének kiértékelését a 15. ábra, a mérésekből becsült ellenállás eloszlását az egyik szelvény mentén a 16. ábra mutatja be.

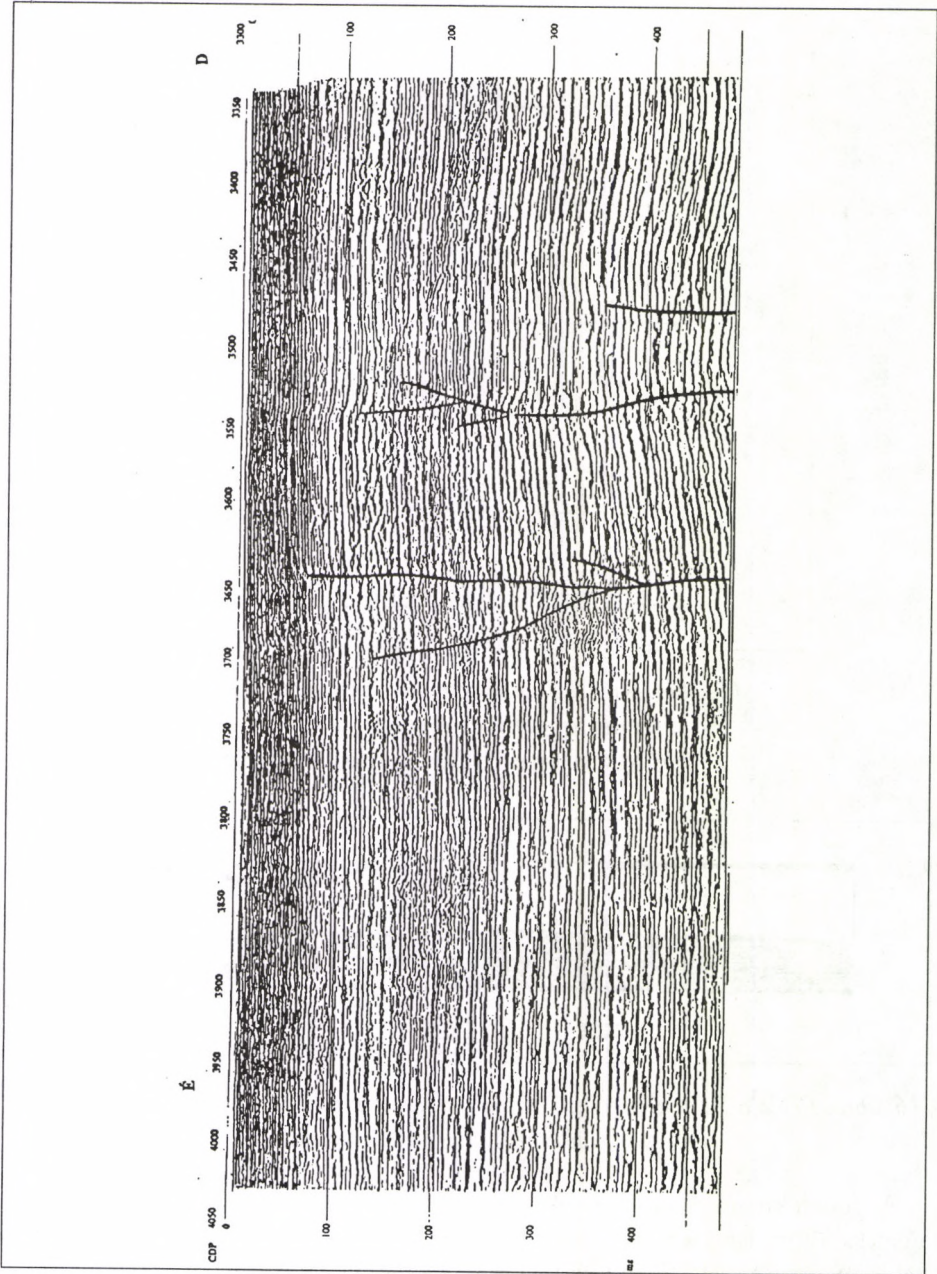


15. ábra. Kiértékelt geoelektromos szondázási görbe.  
A vízszintes tengelyen az ellenállás logaritmus, a függőleges tengelyen  $AB/2$  logaritmus szerepel



16. ábra. Példa a Paks környékén mért ellenállásslévényekre, melyekkel a változások mintegy 60 méter mélységig voltak nyomozhatók

A geoelektromos szelvények „gyanús” helyeit földradarral is vizsgálták. Végül a földradar-szelvényeken kijelölt zavarzónákat 2 méter mélységű árkokkal is megvizsgálták. Ezek hossza ugyan a teljes geoelektromos szelvényrendszer hosszának csak 2,5%-a volt, de megnyugtatónak mondható, hogy egyetlen helyen sem találtak fiatal mozgásra utaló nyomokat.



17. ábra. Kiértékelt sekélyszizmikus szelvény.  
A jól látható, a szelvényen bejelölt vetődés nem hatol a felszínig

A döntő bizonyítékot a szeizmikus mérések szolgáltatták. Az 1994 októberében a Dunán végzett vízi szeizmikus mérések a paksi atomerőmű 15 km-es környezetében a Duna alatti üledékösszletről nyújtottak képet közvetlenül a mederfenéktől több mint 500 méteres mélységig. A mérések célja a Dunát harántoló vetős szerkezetek részleteinek tisztázása volt. Az értelmezéshez felhasználták szárazföldi sekélyszeizmikus szelvények újra fedolgozott változatait is.

A szerkezetek kijelölése megbízhatóan elvégezhető volt. Megerősítették az erőműtől délre haladó K-ÉK irányú fővető, valamint egy másik, az erőmű közvetlen közelében húzódó É-K irányú vető létezését. A paksi telephely körzetében megismert vetők azonban a legfiatalabb, dunai folyami hordalékokból álló és 20–60 m vastagságot elérő, felszíni rétegösszletet láthatóan nem érintik, azaz a vetők nem hoztak létre felszínig hatoló, az alkalmazott nagy felbontású szeizmikus módszerekkel leképezhető elmozdulásokat. A 17. ábra egy ezt illusztráló kiértékelt szeizmikus szelvényt mutat be. A megállapítás a dunai hordalékok által képviselt idő-intervallumra érvényes. A „capability” kizárása nem jelent automatikusan állásfoglalást a mai aktivitás kérdésében, mert a rideg kéregben bekövetkező földrengés nem feltétlenül hoz létre felszínig hatoló törésvonalat. Nem zárható ki, hogy a vető ma is aktív, elhanyagolhatóan kicsi viszont annak a valószínűsége, hogy földrengések felszínig hatoló, számottevő mértékű elvetést hozzanak létre.

## Összefoglalás

A számos ok közül, melyek a környezetvédelmet és természetvédelmet szükségessé teszik, a legfontosabb az, hogy ez az emberiség túlélésének kulcsa. Az ember és természet azonos lényegűek, a természet törvényei tartósak, megváltoztathatatlanok. A túlélés érdekében az embernek együtt kell működnie a természettel. Abba kell hagynia a Föld erőforrásainak kizsákmányolását, és el kell kezdenie egy ésszerű, önmagát megújító működést. Ezeket az elveket követve az emberi élet még hosszú ideig fennmaradhat. Ha a Földet már nem a kertünknek, hanem szeméttárolónak tekintjük, előbb-utóbb elpusztítjuk önmagunkat.

A civilizáció fejlődése során az emberiség egyre fokozódó mértékben hasznosította a Föld anyagait. A 18. század óta a fosszilis energiahordozók bőséges energiát biztosítottak. Lényegében ez tette lehetővé az ipari forradalom kibontakozását. Az elsődleges energiahordozók, a jó minőségű érclelőhelyek és más szükséges ásványinyersanyag-lelőhelyek megtalálása egyre nehezebb, a rosszabb minőségűek hasznosításához bőséges energia kell. A következő évtize-

dekben az olaj-, szén- és gázkutatás mellett fontos az alternatív energiaforrások hasznosítása is.

Az emberi társadalom a hamis látszat ellenére nem egyre kevésbé, hanem egyre jobban függ a véges méretű Föld törekeny ökológiai rendszerének számunkra kedvező működésétől. Az erőforrások végesek, a cselekvés tere korlátozott. A károkozás lehetősége igen nagy, a kár elhárítása rendkívül költséges, sokszor lehetetlen. Az emberi életkörülményeket döntően fogja befolyásolni az, hogy mennyit tudunk, és ismereteinket hogyan tudjuk hasznosítani. Pontosabban kell ismerni a folyamatokat, a beavatkozás következményeit, előre fel kell mérni, ki kell számítani a lehetséges hatásokat. Emiatt a tudomány nemcsak belső értékei miatt lényeges számunkra, hanem a túlélés egyik fontos eszköze is.

A környezettudomány szintetizáló, művelésében szinte valamennyi klasszikus tudományágnak mással nem helyettesíthető szerepe van. Nem versengeni kellene a szűkös forrásokért, hanem együttműködni a feladatok valódi megoldása érdekében. A környezettudomány el nem hanyagolható része a földtudományok nagy családjá. Ezen belül környezetünk állapotának felmérésében, illetve védelmének biztosításában fontos szerepe van a geofizikai módszereknek. Ezt néhány példával és a földrengés-veszélyeztetettség meghatározására végzett vizsgálatok bemutatásával illusztráltam.

Bár a környezeti geofizikáról adtam valamivel részletesebb képet – hiszen ez saját működési területem –, tudatában vagyok annak, és hangsúlyozni is szeretném, hogy a földtudományok más területei nem kevésbé fontosak, és művelésükre éppen olyan nagy szükség van. Természetesen fokozottan érvényes ez a megállapítás más tudományágakra is, legyenek azok akár természet-tudomány vagy a társadalomtudomány területéhez sorolt diszciplínák. A jövő feladatainak megoldásához a tudás és a tudományos kutatás mellett tanításra és nevelésre, a versengés és nyereszkedés helyett együttérzésre, segítőkészségre, a propaganda helyett igazmondásra és közösen végzett, kitartó munkára van szükség.



## Irodalom

- Bolt, B. A., 1978: *Earthquake (a primer)*. W. H. Freeman, San Fransisco.
- Chi-Yu King, 1992: Earthquake prediction techniques. In: *Encyclopedia of Earth System Science*, Vol. 2. pp. 111–117. (Editor in chief: W.E.Nierenberg), Academic Press.
- Coppersmith, K. J. and Youngs, R. R., 1986: *Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessments within intraplate tectonic environments*. Proc. 3rd. U. S. Nat. Conf. Earthq. Engg., Vol. 1: 301–312.
- Cornell, A. C. 1968: Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.* 58 (5): 1583–1606.
- Council of Europe, 1991: *Earthquake prediction: state-of-the-art*. Conclusions of the Conference (Strasbourg, France, 15–18 October, 1991).
- Crowther, J. G.: *Science in Modern Society*. 1967. The Cresset Press. London
- Czelnai R., 1997: Légkör és óceán. (Nem ismerjük a Földet.) *Magyar Tudomány*, CIV: 1163–1176.
- Esteva, L., 1976: Seismicity, 6. fejezet. In: Lomnitz, C. és Rosenblueth (szerkesztők): *Seismic risk and engineering Decision*. Elsevier, Amsterdam.
- Gutenberg, B. and Richter, C. F., 1956: Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 46: 105–145.
- Hall, D. H., 1976: *History of the Earth Sciences during the Scientific and Industrial Revolution*. Elsevier, Amsterdam.
- IAEA 1984: Earthquake Resistant Regulations: A World List. International Association for Earthquake Engineering.
- ICOLD (International Commission on Large Dams), 1987: *Selecting seismic parameters for large dams*. Bulletin 72, Paris.
- Meskó A., 1988: *Bevezetés a geofizikába*. Bp. Tankönyvkiadó.
- Meskó A., 1994: Earthquakes and landslides. In: *Natural disasters in Hungary, National Report for United Nations*, (Szerkesztő: Cs. Nemes).
- Price, D. J. de Solla, 1965: *Little science, big science*. Columbia Univ. Press. New York Univ. Press. Cambridge.
- Réthly, A., 1952: *A Kárpát medence földrendései 455 és 1918 között*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Runcorn, S. K., 1967: *International Dictionary of Geophysics*. Pergamon Press.
- World Data Centre A for Solid Earth Geophysics. 1979. Manual of Seismological Observatory Practice, Report SE-20, U. S. Dept. Commerce, ed. P.L. Willmore, IGS, Edinburgh.
- Sieferle, R. P., 1982: *Der unterirdische Wald. Energiekrise und Industrielle Revolution*. Beck, München.
- Sieferle, R. P.: The energy system – a basic concept of environmental history. In: P. Brimblecombe and C. Pfister (Eds.): *The Silent Countdown*. 1990 p. 9–20. Springer, Berlin.
- Smith, D. G. (szerkesztő): *The Cambridge Encyclopedia of Earth Sciences*. 1981. Cambridge.
- Tóth T.–Horváth F., 1997: Neotektonikus vizsgálatok nagyfelbontású szeizmikus szelvényezéssel. In: Marosi S.–Meskó A. (szerk.): *A Paksi Atomerőmű földrendés-biztonsága*. Budapest, Akadémiai Kiadó, 123–152.
- Zsíros, T., Mónus, P. and L. Tóth, 1989: *Hungarian Earthquake Catalogue (456–1986)*. Hungarian Academy of Sciences, Budapest.
- Zsíros T., 1990: Paks földrendés-kockázatának becslése a szeizmicitás alapján. *Magyar Geofizika*, 31: 124–132.