

## A földrengéshullámok műszeres megfigyelése

A földrengések megfigyelésére szolgáló műszerek, a szeizmográfok (vagy szeizmométerek) feladata, hogy a szeizmológiai obszervatóriumokban rögzítsék a beérkező földrengéshullámok irányát, intenzitását és a hullámok különböző fázisainak beérkezési idejét – azaz meghatározzák a földrengések ideje alatt a talajelmozdulások vektorának időbeli lefutását. A szeizmográfok legfontosabb része egy viszonylag nagyobb tömeg, amely a földdel mereven összekötött tartószerkezettel labilis kapcsolatban áll. Így ha a tartószerkezet a földrengéshullámok hatására elmozdul, a tömeg a tehetetlenségénél fogva helyben marad. A tömeg és a tartószerkezet relatív elmozdulását írószerkezet rögzíti. Mivel a talaj elmozdulása vektormennyiség, így egyértelmű meghatározásához három komponensét (általában két horizontális és egy vertikális összetevőt) szokás regisztrálni.

## A szeizmográfok elmélete

A szeizmográfok működésének leírásához válasszunk olyan koordináta-rendszert, amelynek kezdőpontjában  $m$  tömeget helyezünk el. Ha a koordináta-rendszert az észlelés helyéhez rögzítjük, akkor a talajelmozdulás a koordináta-rendszer elmozdulásának felel meg. Ha az  $m$  tehetetlen tömeg teljesen csatolásmentesen helyezkedne el a koordináta-rendszerként szolgáló tartószerkezetben, akkor  $s$  nagyságú talajelmozdulás esetén a talajhoz rögzített koordináta-rendszerben a tömeg a tehetetlensége miatt látszólag  $-s$  mértékben mozdulna el. Mivel a tehetetlen tömeget a Föld felszínén nem lehet teljesen csatolásmentesen elhelyezni, a földrengések által okozott talajelmozdulások hatására a csatoláson keresztül az  $m$  tömegre a  $t$  idő függvényében változó  $m f(t)$  külső gyorsító erő hat. Ezzel ellentétes irányú az  $m$  tömegre ható  $-m\omega_0^2 s$  visszatérítő erő, mely a rendszer  $\omega_0$  saját körfrekvenciájának, valamint a tömeg nyugalmi helyzetétől mérhető  $s$  elmozdulásának függvénye.

Mivel a csatoláson keresztül a talajelmozdulások megváltoztatják az  $m$  tömeg eredetileg zérus mozgási energiáját, ennek felemésztése érdekében a rendszert csillapítani kell. A csillapítás lehet akár mechanikus, akár elektrodinamikus. A csillapítóerő rendszerint az elmozdulás sebességével arányos, ezért  $-2km ds/dt$  alakban írható (ahol  $k$  a csillapítási tényező).

Végül is tehát az észlelés helyén a talajhoz rögzített koordináta-rendszerben rugalmas jellegű erővel csatolt és valamilyen módon csillapított  $m$  tömeg mozgásegyenlete külső erőhatás által okozott  $f(t)$  gyorsulás esetén:

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = m f(t) - m \omega_0^2 s - 2km \frac{ds}{dt} .$$

Ezt egyszerűsítve és átrendezve a csillapított harmonikus oszcillátor ismert differenciálegyenletéhez jutunk:

$$\frac{d^2s}{dt^2} + 2k \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = -f(t) \quad (1)$$

A szeizmográfok a talajelmozdulásokat; vagyis az  $m$  tömeg  $s$  kitérését  $V$ -szeresére nagyítják és ezt regisztrálják. Ha a regisztrált értékeket  $y$ -nal jelöljük, akkor:

$$y = Vs$$

ahol  $V$  a szeizmográfok statikai, vagy egyensúlyi nagyítása. Ezzel az (1) egyenlet:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2k \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = -Vf(t) \quad (2)$$

ami a *szeizmográfok általános egyenlete*, és a szeizmográfok indikátor egyenletének is szokás nevezni.

Ennek a másodrendű, állandó együtthatójú, lineáris, inhomogén differenciálegyenletnek (amely egyébként a nagyítástól eltekintve formailag minden mechanikai rezgés általános differenciálegyenlete) megoldásakor a következő alapeseteket különböztetjük meg:

**1.** Ha a külső erőhatás az  $m$  tömeg kitérítése után megszűnik, vagyis  $f(t)=0$ , továbbá csillapítás sincs, tehát  $k=0$ , akkora (2) az alábbi egyszerű formában írható:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \omega_0^2 y = 0$$

ami viszont a *harmonikus rezgőmozgás* differenciálegyenlete. Az írószerkezet által rajzolt görbe egyenlete ennek megoldása:

$$y = A \sin(\omega_0 t + \tau)$$

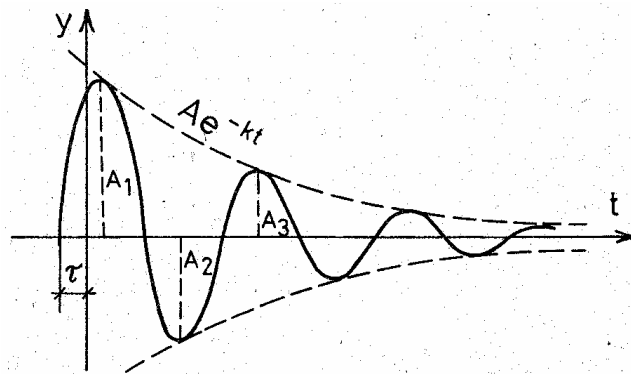
ahol  $A$  a regisztrált görbe amplitúdója,  $t$  a kezdőfázis,  $\omega_0$  pedig a magára hagyott rendszer sajátfrekvenciája.

**2.** A második alapesetként tételezzük fel, hogy a rendszer ugyancsak szabadrezgést végez, tehát a kitérítés után a külső erőhatás megszűnik  $|f(t)=0|$ , de most a rendszerben csillapítás működik, vagyis  $k \neq 0$ . Ebben az esetben (ha a csillapítási együttható  $k < \omega_0$ ) akkora (2) az alábbi formára egyszerűsödik:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2k \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = 0$$

ami viszont a *csillapított rezgőmozgás* differenciálegyenlete. Ennek megoldása az írószerkezet által rajzolt görbe egyenlete:

$$y = Ae^{-kt} \sin(\omega_0 t + \tau) .$$



1. ábra. A csillapított rezgőmozgás képe

A mozgásra jellemző, hogy az 1. ábrán látható módon  $A_1 > A_2 > A_3 > \dots$ , vagyis az amplitúdó állandóan csökken, de az amplitúdók

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{A_2}{A_3} = \dots = K$$

aránya állandó.  $K$  a rendszer csillapítási viszonya. A szélső értékek pontjai az

$$y = \pm A e^{-kt}$$

exponenciális görbén fekszenek. A megoldásban szereplő  $\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - k^2}$  mennyiség a csillapított rendszer sajátfrekvenciája.

3. A harmadik esetben tételezzük fel, hogy az  $f(t)$  külső erőhatás az idő függvényében periódusosan változó talajrezgés:

$$f(t) = x_0 \sin \omega t$$

ahol  $x_0$  a külső erőhatás (a talajrezgés) amplitúdója,  $\omega$  pedig ennek frekvenciája. Ebben az esetben a (2.16) megoldása:

$$y = \frac{Vx_0\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4k^2\omega^2}} \left[ \sin(\omega t + \varphi) + e^{-kt} \frac{\omega}{\omega_r} \sin(\omega_r t + \tau) \right],$$

vagyis a megoldásnak van egy periódusos része, amely a külső elmozdulás periódusában de  $\varphi$  fáziskéséssel jelentkezik, és van egy időben csökkenő, tranzien rész, mely csupán a szeizmográf adataitól függ és időben gyorsan lecseng. A tranzien tagot elhanyagolva azt kapjuk, hogy a szeizmográf az  $f(t) = x_0 \sin \omega t$  talajmozgást az

$$y = VZx_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

alakban

$$\varphi = \arctan \frac{2k\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (4)$$

fáziskéséssel regisztrálja, ahol  $V$  a már említett statikus nagyítás, és

$$Z = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4k^2\omega^2}}$$

az ún. *amplitúdótényező*, mely a külső talajelmozdulás periódusának is függvénye. Ha azt kívánjuk valamely szeizmográfól, hogy hűen képezze le a talajmozgást, akkor a  $Z$  értékének gyakorlatilag függetlennek kell lennie a talajmozgástól.

Vezessük be ezek után az

$$\alpha = \frac{k}{\omega_0}$$

relatív csillapítási tényezőt és a

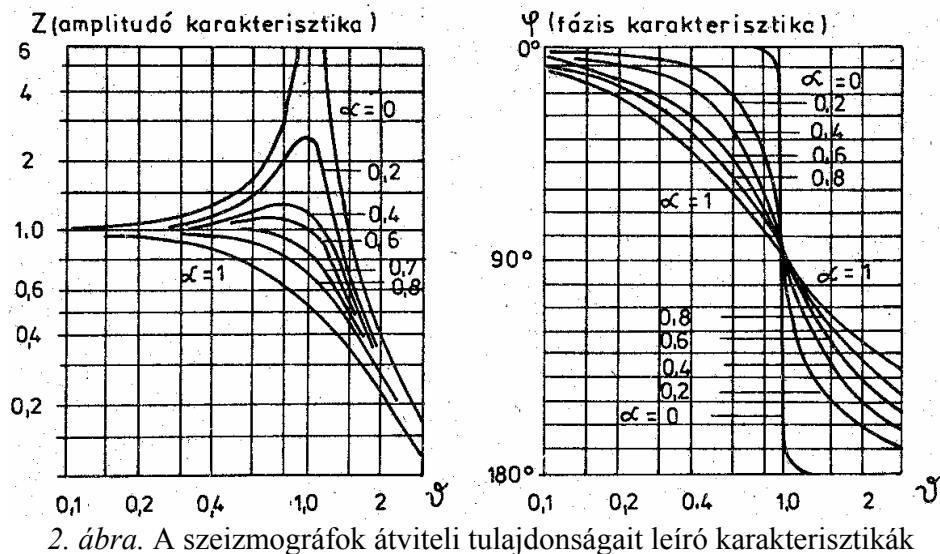
$$\vartheta = \frac{\omega_0}{\omega}$$

relatív frekvenciát. Ha az amplitúdótényező számlálóját és nevezőjét  $\omega^2$ -tel elosztjuk, akkor a most bevezetett jelölésekkel:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{(\vartheta^2 - 1)^2 + 4\alpha^2\vartheta^2}} \quad (5)$$

A  $Z$  amplitúdótényező és a  $\varphi$  fáziskésés változását a  $\vartheta$  relatív frekvencia függvényében a 2. ábrán láthatjuk logaritmikus koordináta-rendszerben ábrázolva. A különböző görbék más-más relatív csillapítás értékekre vonatkoznak, a görbék mellett feltüntetett számok az  $\alpha$  paraméter értékét adják meg.

Az amplitúdó és a fáziskarakterisztikák jellege egyszerű, szemléletes fizikai megfontolásokból is következtethető. Kis frekvenciájú, azaz lassú talajelmozdulások esetén a szeizmográfban levő tehetetlen tömeg csaknem együtt mozog a földhöz rögzített tartókerettel. Relatív elmozdulásuk kicsi, emiatt az amplitúdótényező kis értéket vesz fel és a fáziskésés is közel zérus. Nagy frekvenciájú, azaz gyors talajelmozdulások esetén a lengő tömeg tehetetlensége miatt eredeti nyugalmi helyzetében marad, vagy attól csak kevéssel mozdul el. A tartó keret és a lengő relatív elmozdulása szinte teljesen megegyezik a keret és így a talaj elmozdulásával, de ezzel ellentétes irányú. Emiatt az amplitúdókarakterisztika közel egységnyi, a fáziskarakterisztika pedig  $180^\circ$  az ellentétes fázis miatt. A műszer sajátfrekvenciája környékén rezonancia lép fel és az is nyilvánvaló, hogy kisebb csillapítás mellett a rezonanciacsúcs nagyobb.



Láthatjuk tehát, hogy a 2. ábrán bemutatott átviteli karakterisztikáknak a talajelmozdulások élethű leképezése szempontjából van alapvetően fontos szerepük. Fentebb már megállapítottuk, hogy valamely szeizmográf a periódusosan változó  $x$  talajelmozdulást akkor jegyzi fel helyesen a frekvenciától függetlenül, ha  $Z$  értéke állandó. A 2. ábrán látható amplitúdó-karakterisztikák szerint ez akkor áll fenn, ha a  $\vartheta$  relatív frekvencia értéke kicsi, vagyis ha a talajmozgás  $\omega$  frekvenciája lényegesen nagyobb, mint a szeizmográf  $\omega_0$  sajátfrekvenciája. Emellett az is fontos, hogy a  $Z$  értéke állandó maradjon akkor is, ha a földrengések  $\omega$  frekvenciája tág határok között változik. Ez az  $a$  megfelelő választásával érhető el. A 2. ábrán látható, hogy a  $Z$  értéke az  $\alpha = 0.7$  körüli érték esetén tekinthető a leghosszabb szakaszon állandónak (a  $\vartheta$  tengellyel párhuzamosnak, vagyis az  $\omega$ -tól függetlennek).

## A földrengésjelző műszerek felépítése

A szeizmográfoknak bizonyos körülmények között akár  $10^{-1}$ – $10^{-6}$  milliméteres talajelmozdulásokat is regisztrálni kell, a fontos frekvencia tartomány pedig legalább 0.01 Hz-től 100 Hz-ig terjed. Ezeknek a követelményeknek a teljesítése igen komoly technikai feladat.

Korábban már említettük, hogy a földrengéshullámok tanulmányozásához a talaj elmozdulásának három komponensét (általában két horizontális és egy vertikális összetevőjét) szükséges regisztrálni. Ennek megfelelően a regisztráláshoz *horizontális és vertikális ingákat* alkalmazunk. A nagy érzékenység elérése céljából a szeizmográfokat asztatizálni szokták. Az *asztatizálás* olyan új erő alkalmazását jelenti, mely növelni igyekszik a létrejött elmozdulást.

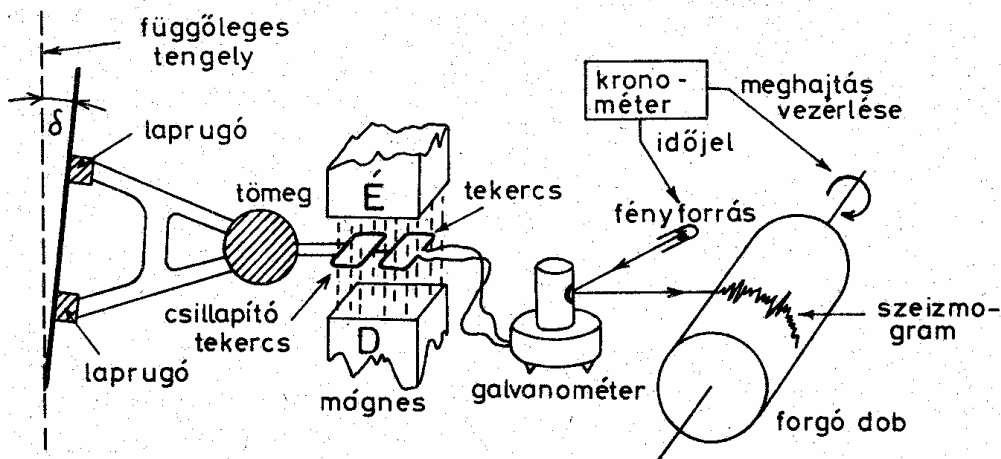
A *horizontális ingák* szerkesztésekor gondot jelent, hogy a hosszú periódusidejű mozgások regisztrálásához igen hosszú ingarúd lenne szükséges. (Ha pl. 0.1 Hz frekvenciájú – azaz 10 s periódusú – talajmozgásokat kívánunk leképezni, ehhez az

előző pont eredményei alapján olyan ingára van szükségünk, amelynek saját periódusa ennél nagyobb. Az ingák lengésidejét az ismert

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (6)$$

összefüggés adja meg, ami alapján  $T = 10$  s-hoz  $l = 25$  m ingarúd hosszúság tartozik.)

A mai modern műszerekben ezt a problémát a "rossz ajtók elve" alapján oldják meg (a rosszul megépített ajtók forgástengelye nem pontosan függőleges). A 3. ábrán a horizontális elmozdulások regisztrálására alkalmas elektrodinamikus szeizmográfok elvi felépítése látható. Ezekben a műszerekben a tehetetlen tömeget "V" alakú tartókeret csúcsára helyezik és a tartókeret szárait az ábrán látható módon két laprugó segítségével egy nem teljesen függőleges tengelyhez rögzítik. (Ha a függőlegestől való eltérés szögét  $\delta$ -val jelöljük, akkor a (6) összefüggésben a  $g$  helyett  $g \sin \delta$  értékkel kell számolnunk és pl.  $\delta = 1^\circ$  esetén a  $T = 10$  s már 0.5 m ingahosszal elérhető.)

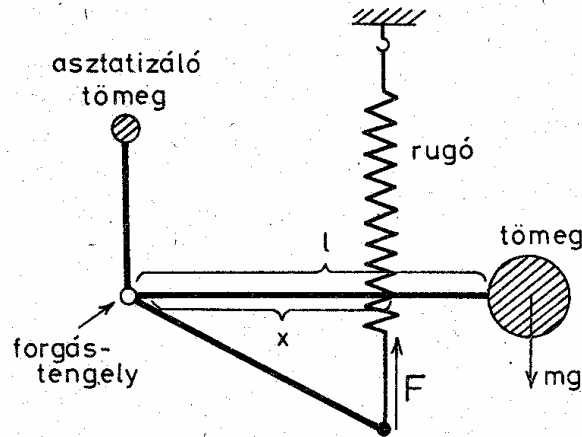


3. ábra. A horizontális elektrodinamikus szeizmográfok elvi felépítése

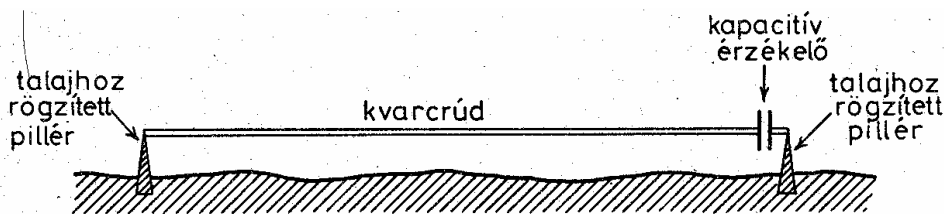
Az elektrodinamikus szeizmográfok esetében a lengő mozgását mágneses térben levő tekerccs segítségével feszültségingadozásokká alakítják, majd megfelelő sajátperiódusú és kellően csillapított galvanométerre kapcsolják. Végül a galvanométer tükréről visszavert fénysugár elmozdulását forgó dobbon elhelyezett fótópapíron rögzítik. A dob forgásának egyenletességét, valamint az időeleket precíziós óramű biztosítja. A lengő csillapítása céljából a tehetetlen tömeghez a 3. ábrán látható módon másik (ún. csillapító) tekerccset is rögzítenek, amelyet az előző tekerccsel együtt ugyanabba a mágneses térbe helyeznek.

A földrengéshullámok függőleges összetevőjének észlelésére szolgáló vertikális szeizmográfok elvi felépítése a 4. ábrán látható. Az itt bemutatott berendezés a Galicinféle szeizmométer lengő része, mely az asztatizálás alapvető módját szemlélteti. Amint a tömeg kitér a vízszintes nyugalmi helyzetéből, megbomlik az  $lmg = xF$  egyensúly; részben mert a visszatérítő  $F$  rugóerő nyomatéka gyorsabban csökken mint az  $mg$  erő forgatónyomatéka, másrészt viszont az asztatizáló tömeg által keltett nyomaték is növeli az elmozdulást. Egyébként a lengő mozgását ebben az esetben is mágneses térbe

helyezett tekercs segítségével feszültségingadozásokká alakítják, amelyet általában galvanométer segítségével forgó dobra elhelyezett fotopapíron rögzítik.



4. ábra. A vertikális szeizmográfok elvi felépítése



5. ábra. A strainméterek elvi felépítése

Napjainkban már lehetőség van az igen hosszú ( $T > 100$  s) periódusú rugalmas rezgések, sőt a több órás periódusú árapály deformációk mérésére is. Ezek regisztrálására különleges berendezéseket, ún. *strainmétereket* (extenzométereket) vagy deformáció mérőket dolgoztak ki. A strainméterek lényege a néhányszor tíz méter hosszúságú kvarcrúd, amelynek egyik végét az 5. ábrán látható módon megfelelő pilléren keresztül a talajhoz rögzítik és rendkívül nagy érzékenységű berendezéssel mérik a kvarcrúd másik végének egy másik pillérhez viszonyított elmozdulását. A relatív elmozdulás mérésére kapacitív érzékelőket, vagy újabban lézer interferométereket alkalmaznak

## Földrengésjelző obszervatóriumok

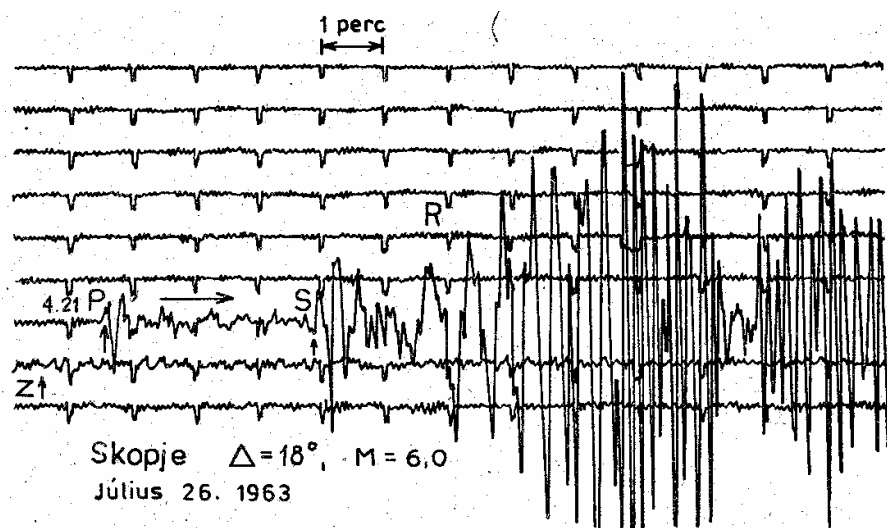
A földrengések akkor tanulmányozhatók kellő alaposággal, ha a rengéseket a Föld különböző pontjain elhelyezett sok műszer regisztrálja. Földünkön kb. 700 szeizmológiai állomás működik, sajnos azonban ezek területi eloszlása elég kedvezőtlen. Hazánkban jelenleg öt obszervatórium működik: Budapesten a Sas-hegyen, a Mátrában Piskéstetőn, Sopronban, Jósvalfőn és Pécsen. A jósvalfői és a pécsi obszervatórium méréseit mikrohullámú rádiókapcsolaton keresztül a budapesti obszervatóriumban is állandóan regisztrálják.

Az obszervatóriumok elhelyezése és berendezése többféle feltétel teljesítését kívánja. Ha valóban a természetes rengéseket kívánjuk regisztrálni, akkor az obszervatóriumokat nagyobb településektől és a forgalmasabb utaktól távolabb kell elhelyezni, ahol az emberi tevékenység által okozott mikroszeizmikus talajnyugtalanág a lehető legkisebb. Fontos az obszervatórium környékének földtani felépítése is, a műszereket lehetőleg alaphegységi kőzetekre, vagy legalábbis kemény kőzetekre célszerű telepíteni.

A jól felszerelt obszervatóriumokban külön készülékcsoport jegyzi a közeli és külön műszercsoport a távoli rengéseket. A különböző rengések tanulmányozására más-más sajátperiódusú szeizmográfok szükségesek. Olyan területeken, ahol gyakoriak a rengések, az obszervatóriumokat el kell látni kis nagyítású műszerekkel is, mivel helyi rengéseknél a nagy nagyítású műszerek olyan mértékben kilenghetnek, hogy a szeizmogramok kiértékelhetetlenek lesznek.

## Szeizmogramok

Az egyes földrengések szeizmogramjain általában három különböző rész különíthető el. A regisztrátumokon először mindig a longitudinális ( $P$ ) hullámok jelentkeznek kis amplitúdóval és viszonylag kisebb periódussal. Ezt követik a transzverzális ( $S$ ) hullámok, amelyekre a hosszabb periódus és a nagyobb amplitúdó jellemző, majd a felületi  $R$  és  $L$  hullámok következnek a legnagyobb amplitúdóval és a leghosszabb periódussal. Mindez jól látható a 6. ábrán, amely az 1963-as Skopje-i földrengésről az Uppsala-i obszervatóriumban rögzített regisztrátumnak részlete.

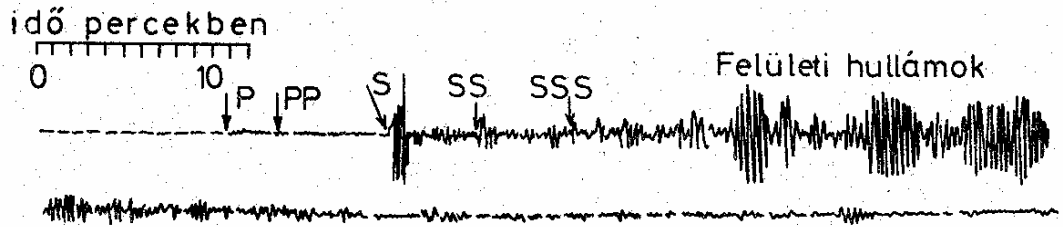


6. ábra. Közepes távolságú földrengés szeizmogramja

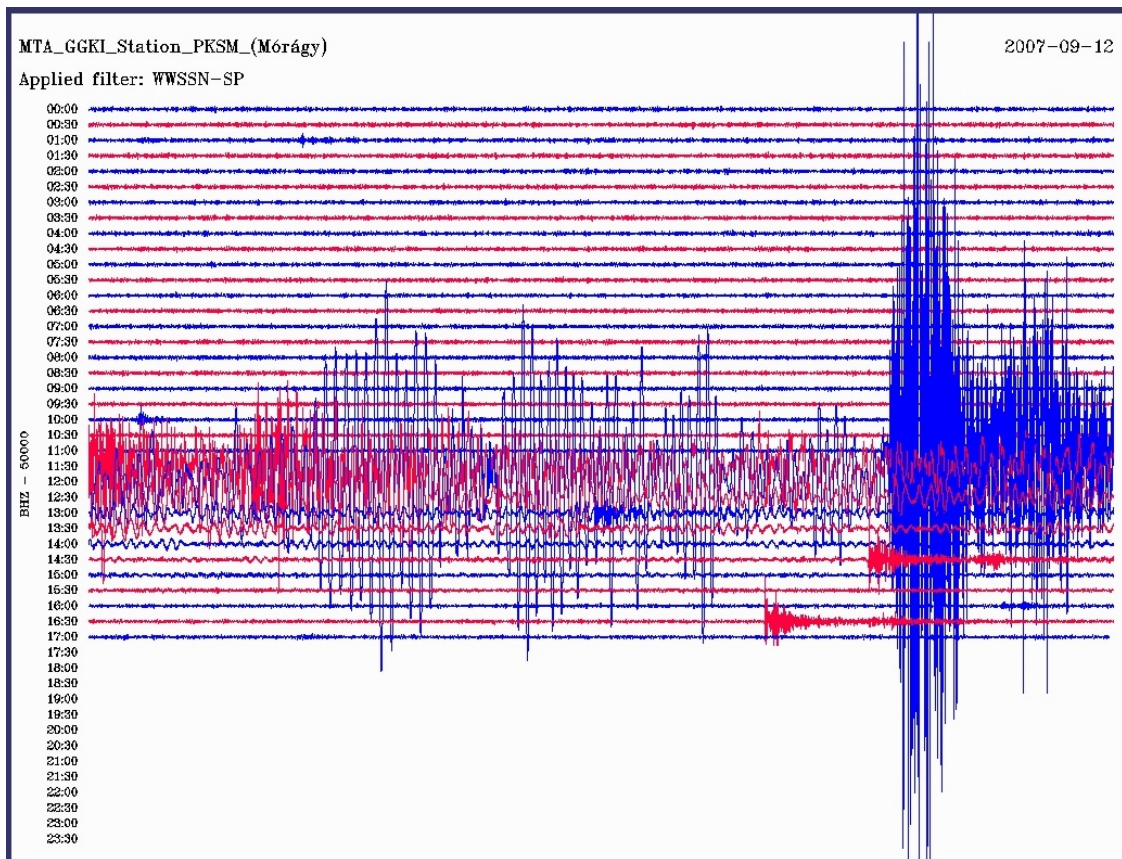
Az egyes szeizmogramokról első látásra meg lehet különböztetni, hogy közeli vagy távoli rengésektől származnak-e. Közeli rengések esetén a  $P$  és az  $S$  hullámok igen közel kerülnek egymáshoz és jól elkülöníthetők. Távoli rengések esetén a különböző hullámok elkülönítése nem egyszerű feladat, mivel a Föld belsejében levő különböző határfelületek a törések és visszaverődések során megsokszorozzák a



hullámokat; és emiatt a szeizmogramokon igen bonyolult interferencia kép jelentkezik. A 7. és a 8. ábrán távoli földrengések szeizmogramjai láthatók az első (*P*) beütéstől a teljes lecsengésig.



7. ábra. Távoli földrengés szeizmogramja

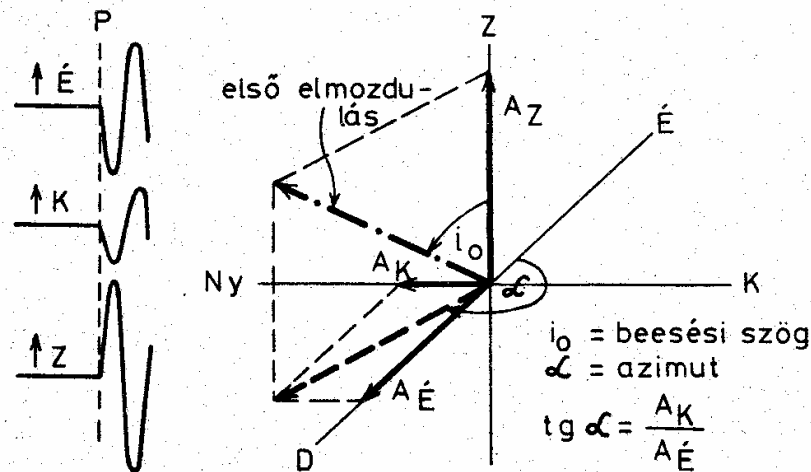


8. ábra. A 2007. szept. 12.-i szumátrai földrengés Mórágýon regisztrált szeizmogramja

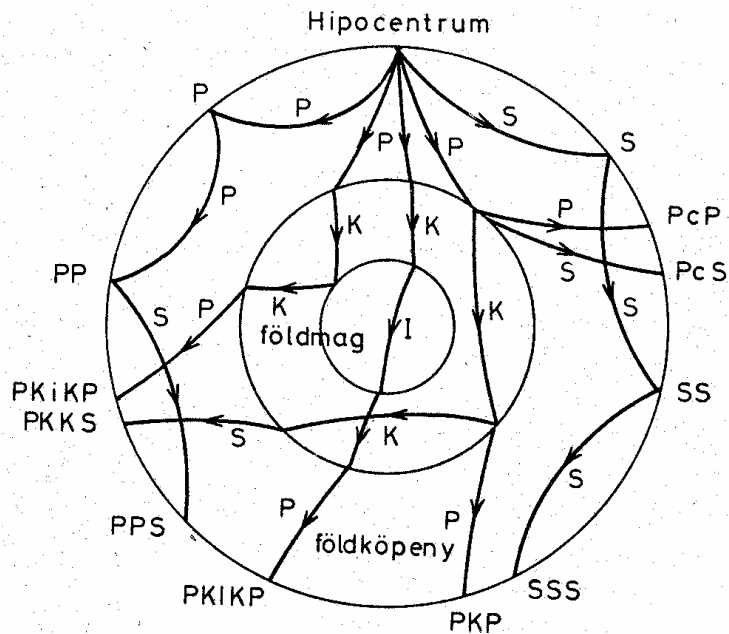
A szeizmogramok további kiértékelése igen nagy gyakorlatot igénylő feladat, amely során meg kell különböztetni és szét kell választani a különböző határfelületekről visszaverődött és a Föld különböző övein áthaladó rengéshullámokat.

A szeizmogramokon a különféle fajtájú és a különböző utakon beérkező hullámokat más-más jelekkel szokás ellátni. Az eddigiek során már láttuk, hogy a közvetlenül beérkező térhullámokat a fajtájuktól függően *P* vagy *S* betűvel jelöljük.

Ezek megismétlése arra utal, hogy a hullám a felszínen visszaverődik. Például *PP* a felszínen egyszer, *PPP* a felszínen kétszer visszaverődött longitudinális hullám, a *PPS* viszont olyan eredeti longitudinális hullám része, mely a második visszaverődéskor transzverzális hullámmá alakult.



9. ábra. Az első talajmozdulás vektorának meghatározása



10. ábra. A földrengéshullámok jelölése

A földmagról való visszaverődés jele *c*, a külső földmagon áthaladó longitudinális hullám jele *K*, a belső mag határán visszaverődő hullám jele *i*, végül a belső magon áthaladó longitudinális hullámé pedig *J*. Így találkozhatunk pl. az alábbi jelölésekkel: *PcP*, *SKP*, *PKIKP* stb. A 10. ábrán néhány ilyen lehetőséget szemléltetünk.