

2.2 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.

2.2.1 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 ω_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:

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + 2k \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = - f(t) \quad (2.15)$$

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

$$y = V s$$

ahol V a szeizmográfok statikai, vagy egyensúlyi nagyítása. Ezzel a (2.15) egyenlet:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2k \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = - V f(t) \quad (2.16)$$

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:

I. Ha a külső erőhatás az m tömeg kitérítése után megszűnik, vagyis $f(t)=0$, továbbá csillapítás sincs, tehát $k=0$, akkora (2.16) az alábbi egyszerű formában írható:

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

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

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

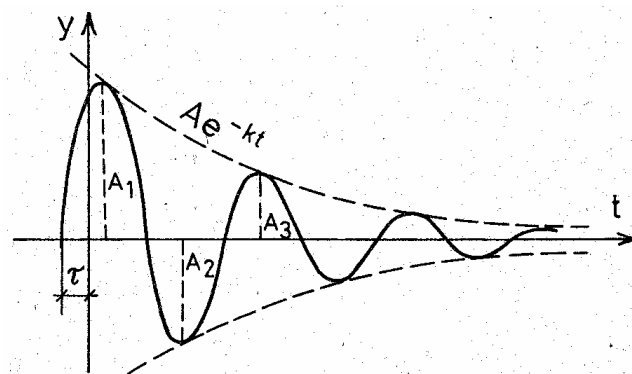
ahol A a regisztrált görbe amplitúdója, t a kezdőfázis, ω_0 pedig a magára hagyott rendszer sajátfrekvenciája.

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 $k < \omega_0$) akkor a (2.16) az alábbi formára egyszerűsödik:

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

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

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



2.10 ábra. A csillapított rezgőmozgás képe

A mozgásra jellemző, hogy a 2.10 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

$$y = \pm Ae^{-kt}$$

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, ω pedig ennek frekvenciája. Ebben az esetben a (2.16) megoldása [36]:

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

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

$$y = VZx_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.17)$$

alakban

$$\varphi = \arctan \frac{2k\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (2.18)$$

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 szeizmográfától, hogy hűen képezze le a talajmozgást, akkor a Z értékének gyakorlatilag függetlennek kell lennie a talajmozgástól.

Vezessük be ezek után az

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

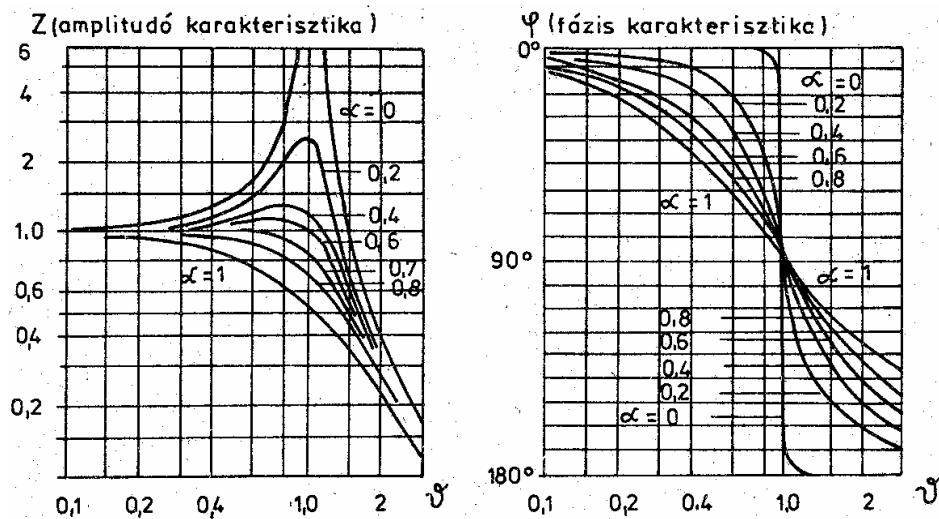
relatív csillapítási tényezőt és a

$$\mathcal{G} = \frac{\omega_0}{\omega}$$

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

$$Z = \frac{1}{\sqrt{(\mathcal{G}^2 - 1)^2 + 4\alpha^2\mathcal{G}^2}} \quad (2.19)$$

A Z amplitúdótényező és a φ fáziskésés változását a ϑ relatív frekvencia függvényében a 2.11 ábrán láthatjuk logaritmusos koordináta-rendszerben ábrázolva. A különböző görbék más-más relatív csillapítás értékekre vonatkoznak, a görbék mellett feltüntetett számok az α paraméter értékét adják meg.



2.11 ábra. A szeizmográfok átviteli tulajdonságait leíró karakterisztikák

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 amplitúdó-karakterisztika közel egységnyi, a fáziskarakterisztika pedig 180° 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 2.11 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 2.11 ábrán látható amplitúdó-karakterisztikák szerint ez akkor áll fenn, ha a ϑ relatív frekvencia értéke kicsi, vagyis ha a talajmozgás ω frekvenciája lényegesen nagyobb, mint a szeizmográf ω_0 sajátfrekvenciája. Emellett az is fontos, hogy a Z értéke állandó maradjon akkor is, ha a földrengések ω frekvenciája tág határok között változik. Ez az a megfelelő választásával érhető el. A 2.11 ábrán látható, hogy a Z értéke az $\alpha = 0.7$ körüli érték esetén tekinthető a leghosszabb szakaszon állandónak (a ϑ tengellyel párhuzamosnak, vagyis az ω -tól függetlennek).

2.2.2 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.

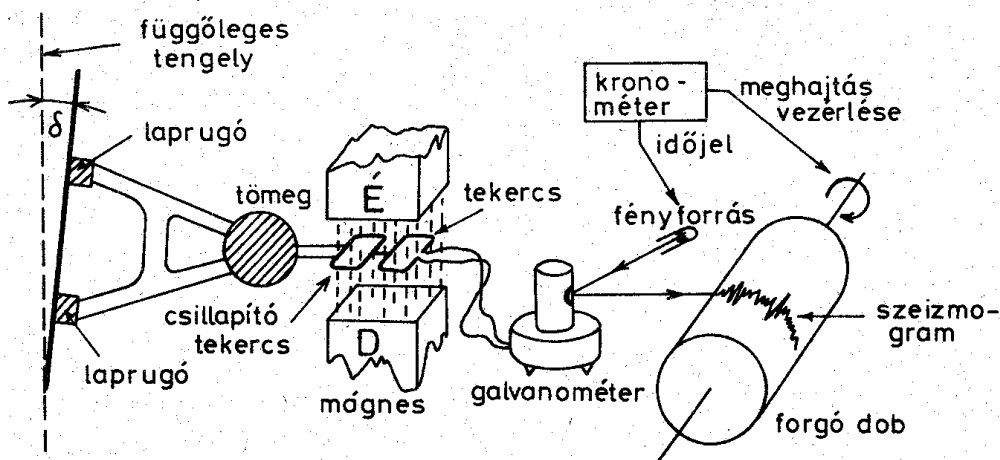
Korábban már említettük, hogy a földrengéshullámok tanulmányozásához a talaj elmozdulásának három komponensét (általában két horizontális és egy vertikális összetevőjét) szükséges regisztrálni. Ennek megfelelően a regisztráláshoz *horizontális és vertikális ingákat* alkalmazunk. A nagy érzékenység elérése 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

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (2.20)$$

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

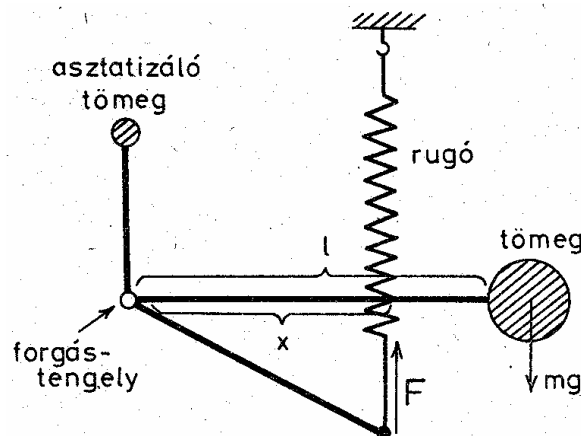
A mai modern műszerekben ezt a problémát a "rossz ajtók elve" alapján oldják meg (a rosszul megépített ajtók forgástengelye nem pontosan függőleges). A 2.12 ábrán a horizontális elmozdulások regisztrálására alkalmas elektrodinamikus szeizmográfok elvi felépítése látható. Ezekben a műszerekben a tehetetlen 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 δ -val jelöljük, akkor a (2.20) 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.)



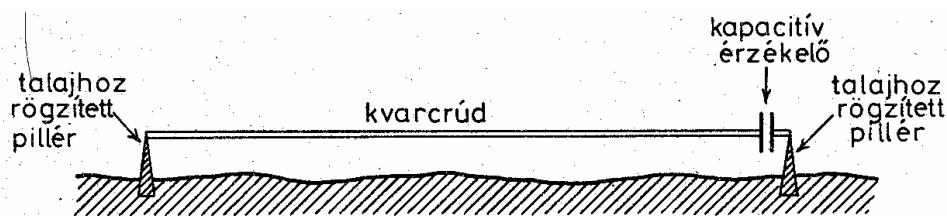
2.12 ábra. A horizontális elektrodinamikus szeizmográfok elvi felépítése

Az elektrodinamikus szeizmográfok esetében a lengő mozgását mágneses térben levő tekercs segítségével feszültségingadozásokká alakítják, majd megfelelő sajátperiódusú és kellően csillapított galvanométerre kapcsolják. Végül a galvanométer tükréről visszavert fénysugár elmozdulását forgó dobon elhelyezett fotopapíron rögzítik. A dob forgásának egyenletességét, valamint az időeleket precíziós óramű biztosítja. A lengő csillapítása céljából a tehetetlen tömeghez a 2.12 ábrán látható módon másik (ún. csillapító) tekercset is rögzítenek, amelyet az előző tekercssel együtt ugyanabba a mágneses térbe helyeznek.

A földrengéshullámok függőleges összetevőjének észlelésére szolgáló *vertikális szeizmográfok* elvi felépítése a 2.13 ábrán látható. Az itt bemutatott berendezés a *Galicin-féle szeizmométer* lengő része, mely az asztatizálás alapvető módját szemlélteti. Amint a tömeg kitér a vízszintes nyugalmi helyzetéből, megbomlik az $\ell mg = xF$ 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.



2.13 ábra. A vertikális szeizmográfok elvi felépítése



2.14 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 a *2.14 ábrán* látható módon megfelelő pilléren keresztül a talajhoz rögzítik és rendkívül nagy érzékenységgű berendezéssel mérik a kvarcrúd másik végének egy másik pillérhez viszonyított elmozdulását. A relatív elmozdulás mérésére kapacitív érzékelőket, vagy újabban lézer interferométereket alkalmaznak

2.2.3 Földrengésjelző obszervatóriumok

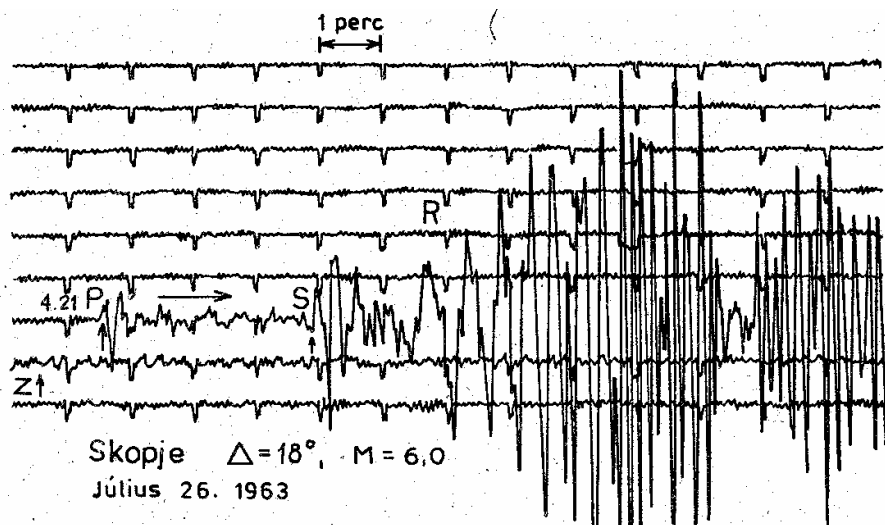
A földrengések akkor tanulmányozhatók kellő alapossággal, ha a rengéseket a Föld különböző pontjain elhelyezett sok műszer regisztrálja. Földünkön kb. 700 szeizmológiai állomás működik, sajnos azonban ezek területi eloszlása elég kedvezőtlen. Hazánkban jelenleg öt obszervatórium működik: Budapesten a Sas-hegyen, a Mátrában Pizskéstetőn, Sopronban, Jósvafőn és Pécsen. A jósvafői és a pécsi obszervatórium méreseit 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 talajnyugtalanosság 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 készülécsoport 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.

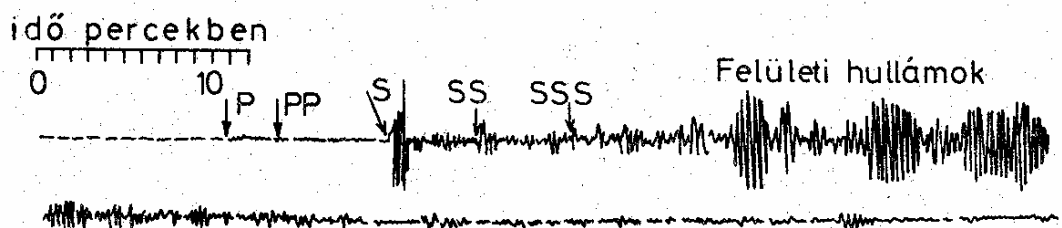
2.2.4 Szeizmogramok

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 *2.15 ábrán*, amely az 1963-as Skopje-i földrengésről az Uppsala-i obszervatóriumban rögzített regisztrátumnak részlete.



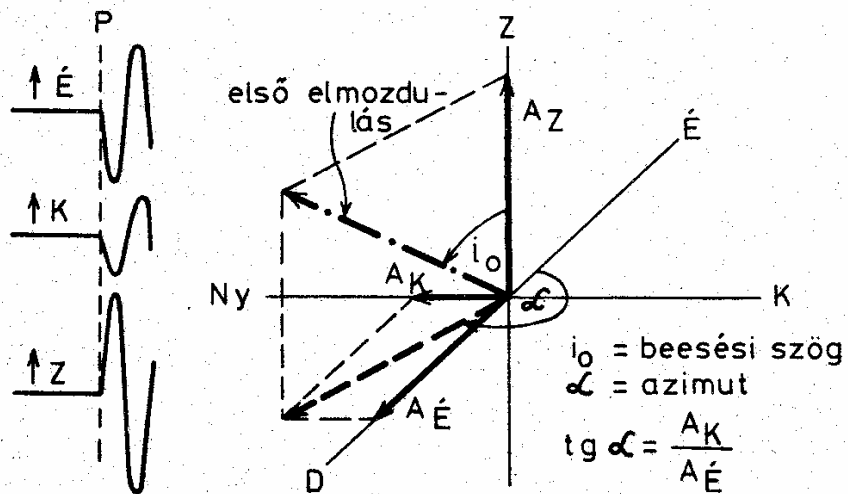
2.15 ábra. Közepes távolságú földrengés szeizmogramja

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 2.16 ábrán egy távoli földrengés szeizmogramja látható az első (P) beütéstől a teljes lecsengésig.



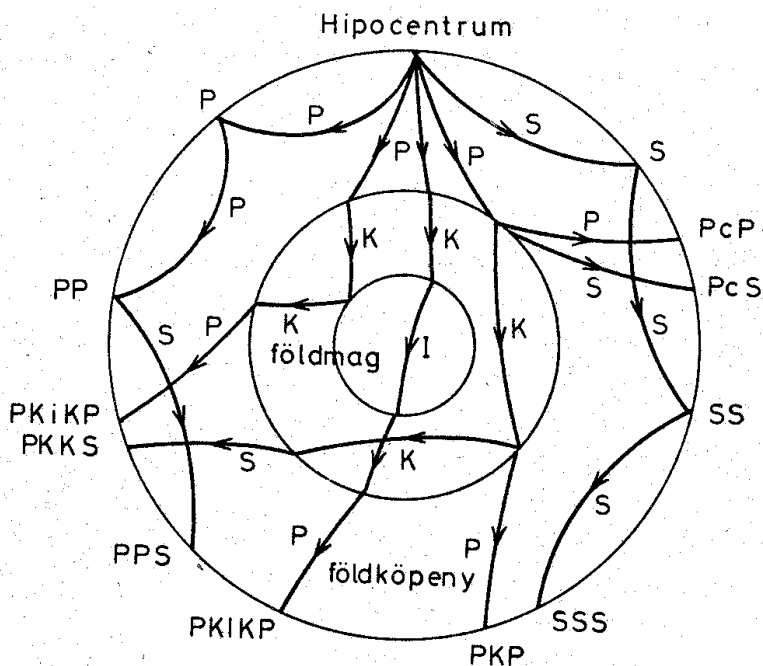
2.16 ábra. Távoli földrengés szeizmogramja

A szeizmogramok kiértékelése során a legfontosabb feladat az elsőnek beütő P hullám beérkezési idejének és az első talajelmozdulás irányának meghatározása. Két horizontális és egy vertikális szeizmográf megfelelő alkalmazása esetén a különböző rengéshullám összetevők első beérkezéséből - mint vektorösszetevőből - éppen az első talajelmozdulás adódik, amely kijelöli az obszervatóriumon és az epicentrumon átmenő síkot. A 2.17 ábrán azt láthatjuk, hogyan lehet meghatározni az első elmozdulás vektorát két horizontális és egy vertikális szeizmográf által \acute{E} - D , K - N_y illetve a Z függőleges irányban regisztrált első P beütések alapján.



2.17 ábra. Az első talajelmozdulás vektorának meghatározása

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.



2.18 ábra. A földrengéshullámok jelölése

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.

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 I , a transzverzális hullámé pedig J . Így találkozhatunk pl. az alábbi jelölésekkel: PcP , SKP , $PKIKP$ stb. A 2.18 ábrán néhány ilyen lehetőséget szemléltetünk.