

А. Адам:

## МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ

После короткого обзора настоящего состояния магнитотеллурических исследований, рассматривается проблема разброса значений напряженности поля теллурических токов  $\mu = \frac{M_x}{E_y}$  причиной чего считается геологическая неоднородность слоев. Эта неоднородность выражается в электрической анизотропии и изучение разброса значений  $\mu$  может служить основой для создания метода построения анизотропии - S.

После теоретического рассмотрения зависимости описываются практические методы для определения эллипса анизотропии, причем сначала используются абсолютные эллипсы, а затем индивидуальные, точно определенные эллипсы. Отдельные методы подвергаются критическому обсуждению. Особое внимание уделяется роли фазового отклонения между магнитными и теллурическими компонентами.

Наконец показано, что эллипс анизотропии имеет значение в основном за счет того, что им отражаются только электрические аномалии залегающих под пунктом наблюдения пластов. До введения магнитотеллурических методов эллипсы анизотропии можно было получить только с применением гораздо более дорогостоящих методов.

A. Ádám

## MAGNETOTELLURISCHE ANISOTROPIE

Nach einer kurzen einleitenden Übersicht über den heutigen Stand der magnetotellurischen Forschung wird auf das Problem der Streuung des Quotienten

$$\mu = \frac{M_x}{E_y}$$

eingegangen und als Ursache die geologische Inhomogenität der Schichten angegeben. Diese Inhomogenität kommt in der elektrischen Anisotropie zum Ausdruck und eine Methode der Konstruktion der S-Anisotropie kann auf die Untersuchung der Streuung der  $\mu$ -Werte aufgebaut werden.

Nach einer tensoriellen theoretischen Behandlung der Zusammenhänge werden praktische Methoden zur Bestimmung der Anisotropie-Ellipse angegeben, wobei zuerst Absolut-Ellipsen, dann individuelle, punktweise bestimmte Ellipsen zugezogen werden. Die einzelnen im Gebrauch erscheinenden Methoden werden einer kritischen Betrachtung unterwor-

fen; insbesondere wird auf die Rolle der Phasendifferenz zwischen der magnetischen und tellurischen Komponente hingewiesen.

Zum Schluss wird hervorgehoben, dass die magnetotellurische Anisotropie-Ellipse ihre Bedeutung davon gewinnt, dass sie nur die in den unter dem Messpunkte liegenden Schichten vorhandenen elektrischen Anomalien wieder spiegelt. Solche Darstellung konnte vor der Einführung der magnetotellurischen Methode nur durch Anwendung viel kostspieligerer Verfahren gewonnen werden.

## MAGNETOTELLURIKUS ANIZOTRÓPIA

Ádám Antal

### Bevezetés.

Az elmúlt néhány évben megélnékvált a magnetotellurikus kutatás különösen a Szovjetunióban. Ennek oka nagyrészt abban rejlik, hogy a szovjet geoelektromos iskolának sikerült bizonyos, gyakran fennálló határfeltételek mellett egyszerű asszimptotikus összefüggéseket levezetni a mágneses és tellurikus tér kapcsolatára /1/. A kapcsolatot olyan mennyiséggel fejezték ki, amely eddig is a gyakorlati geoelektromos /tellurikus/ kutatásnak közvetlen tárgya volt. Ez a mennyiség a

horizontális vezetőképesség:  $s = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{\mathcal{G}_i}$ , ahol  $h_i$  = az  $i$ -edik réteg

vastagsága,  $\mathcal{G}_i$  =  $i$ -edik réteg fajlagos ellenállása. Így a tulajdonképpen két rétegre - jól vezető üledék nagyellenállású alaton - leegyszerűsített magnetotellurika máris jó szolgálatot tesz a gyakorlati kutatásban, a tellurika geofizikai és technikai, azaz gazdasági értékének növelésével. Közben tovább folyik az az elméleti munka, amelynek célja, hogy a Cagniard és Tyihonov által megadott uton nagyteljesítményű számológépekkel elméleti görbéket dolgozzanak ki a több-réteges geoelektromos szelvények magnetotellurikus frekvenciaszondázására. Néhány kísérletet máris végeztek ennek a kétségtelenül fejlettebb módszernek alkalmazására /2, 3/. Az üzemszerű méréseknek azonban részben még technikai, részben pedig tudományos előfeltételei is hiányoznak. /Gondolunk itt elsősorban a  $\mathcal{G} - \sqrt{T}$  görbék kezdeti szakaszának meghatározásához szükséges nagyobb frekvenciájú természetes elektromágneses tér vizsgálatára./

Kutatásaink célja a leegyszerűsített magnetotellurikában rejlt további lehetőségek feltárása volt.



A probléma felvetése.

Ha a /4/ tanulmányban /lásd l211. old.-on/ közölt adatokat vizsgáljuk, meg kell állapítanunk, hogy a  $\mu = \frac{M_x}{E_y}$  viszonyban /ahol  $M_x$  az

$M_x$  mágneses térerősség  $x$  és az  $E_y$  az  $\xi$  tellurikus térerősség  $y$  komponense/ nagy szórások vannak, amelyeket a periódikus különbséggel /  $\Delta T$ / és a kiolvasási pontatlansággal sem lehet megmagyarázni. Pl. a szélső értékek  $\mu_{\max} = 1,59 / \sqrt{T} = 6,48/$ , illetve  $\mu_{\min} = 0,98 / \sqrt{T} = 5,48/$ . A sorozat átlagperiódusának négyzetgyöke:  $\sqrt{T} = 4,8$ ,  $\mu$  átlagértéke pedig  $\mu_x = 1,18$ . Hajlamosak vagyunk arra, hogy a nagy középhibát az elektromágneses tér forrásainak időben változó jellegével és helyzetével, tehát a gerjesztéssel magyarázzuk. /2/. Az elektromágneses pulzációk nagyméretű kiterjedése és egyöntetősége miatt /5/ valószínűbb azonban, hogy a szórást geológiai inhomogenitások okozzák, amelyek a horizontálisan egynemű közegre levezetett alapszefüggésekben természetesen nem szerepelnek. Mindkét fenti zavaró tényezőre nézve felvilágosítást adhat különben a  $Z$  komponens nagysága.

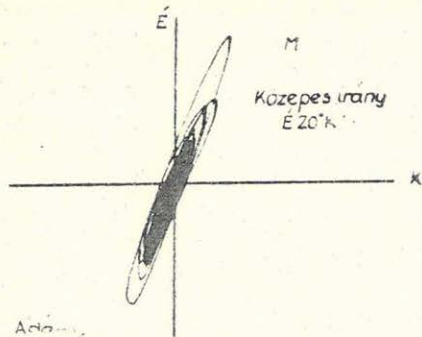
A geológiai inhomogenitás az elektromos anizotrópiában jut kifejezésre, amelyet matematikailag másodrendű tenzorral jellemezhetünk. Az anizotrópia-ellipszoid horizontális metszete a körkörös vertikális elektromos szondázásból és a tellurikából ismert anizotrópia-ellipszis. A tellurikus anizotrópia a horizontális vezetőképesség irányfüggését adja meg, amely az alapkőzet szerkezetváltozásait, vagy az üledékkomplexum belső anizotrópiáját jelzi, illetve általános esetben a kettőt együtt. Minthogy a magnetotellurika a mágneses és tellurikus tér közötti összefüggésből szintén a horizontális vezetőképességet /illetve a fajlagos vezetőképességet/ számítja ki, lehetőséget kell adnia az anizotrópiájának meghatározására is. A  $\mu$  értékek szórása az  $S$  anizotrópia megszerkesztésének alapja lehet.

Az anizotrópia-ellipszis meghatározásának elvi alapjai.

Ha tenzorokkal felvázoljuk az elektromágneses tér jelenségeit a Föld felszínén, jól használható utmutatást kapunk az anizotrópia-viszonyok számításához.

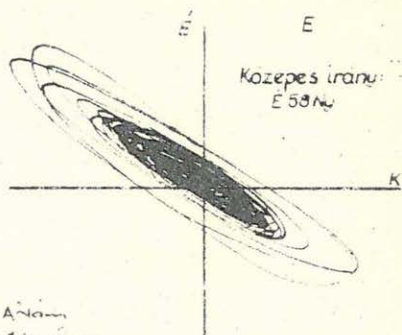
A földi mágneses tér, mint ismeretes, állandó és változó komponensből áll. A térerősség változó komponensének vektor végpontja valamilyen vektográf ernyőjén elliptikus hodográfot ír le /L. 1. ábrát/, hasonlóan a tellurikus térerősségvektorhoz. Ennek az elliptikus hodográfának határesetek kör. Az ellipszis egy tenzor induktrixa, amely meghatározza valamely fiktív, homogén, izotróp viszonyok mellett léte-

ző térerősség /-változás/ torzulását /transzformációját/ a kérdéses pontban./L.a tellurikus abszolút ellipszisek problémáját pl. /6/-ban/.



Adott  
1/a ábra

1/a. ábra. Mágneses pulzációk vektordiagrammja /katódoszilloszkóp ernyőjén/



Adott  
1/b ábra

1/b. ábra. Tellurikus pulzációk vektordiagrammja /katódoszilloszkóp ernyőjén/

Ezen az alapon a mágneses térerősség a következő kifejezéssel írható fel:

$$\mathcal{M} = \{M\} \pi \quad \dots /1/$$

ahol  $\{M\}$  az un. mágneses, vagy forrástenzor,  $\pi$  homogén, izotróp viszonyok mellett a térerősség egységvektora. Tartozék  $\mathcal{M}$  mágneses térerősséghez  $\xi$  elektromos térerősség. Származtassuk le  $\xi$ -t a mágneses és elektromos terek közötti összefüggések /Maxwell-egyenletek/ alapján ugyanabból az egységvektorból, amelyet a mágnes tér kifejezésében használtunk. Legyen tehát

$$\xi = \{E\} \pi \quad \dots /2/$$

ahol  $\xi$  az elektromos térerősségtenzor. Mint a kísérleti mérési adatok is igazolják, homogén izotróp altalajviszonyok mellett  $\{M\}$  és  $\{E\}$  tenzor indikátrixa  $90^\circ$ -al el van forgatva egymáshoz képest. Általában mindkét tenzort meghatározhatjuk bizonyos feltevések mellett, a vektordiagrammjaikat helyettesítő abszolút-ellipszisekből.

Vizsgáljuk meg az áram és mágneses terének kapcsolatát anizotróp közegben, amint azt egyes szovjet kutatók is tették /7/ a két tér közötti fáziskülönbség magyellenállásu alzat felett észlelt eltűnése alapján. Az áram periódusát válasszuk meg úgy, hogy az áramkiszorítást elhanyagolhassuk. Ez a helyzet az üledékes kőzetben, az alaphegység fölött, ha  $T \gg 10$  sec. Maxwell első egyenletéből következik:



M = cJ .../3/

ahol J = az áramsűrűség, c = az áram folyási szelvényével, s így pl. az alaphegység mélységével arányos tényező. /3/ Vektoros formában:

{F} n = {F} ({M} n) = c] .../4/

ahol J az áramsűrűség vektora, {F} tenzor pedig az elektromágneses tér törvényei szerint 90°-al forgató tenzor. {F} tenzor matrixa:

{F} = ( 0 1 / -1 0 ) .../5/

Ohm törvénye szerint az elektromos térerősség:

{E} = {E} n = {Tg} ] = {Tg}^{-1} ] .../6/

ahol {Tg} a fajlagos ellenállás, {Tg} a fajlagos vezetőképesség tenzora. Helyettesítsük /4/-ből /6/-ba áramsűrűségvektort:

{E} = {E} n = 1/c {Tg}^{-1} {F} {M} n .../7/

Az egységvektorok elhagyásával a következő tenzoregyenlőség írható fel:

c {Tg} = ( {F} {M} ) {E}^{-1} = c' {S} .../8/

ahol {S} a horizontális vezetőképesség tenzora, amelyet éppen meghatározni kívánunk.

Ezzel a tárgyalási móddal nem tudunk megnyugtató választ adni arra a kérdésre, hogy honnan származik a mágneses tér anizotrópiája, amelyet megfigyeléseink során észlelünk. Éppen ezért a terek kialakulásának elfogadhatóbb magyarázatát adja az indukciós elmélet, amelynél az {M} tenzor az ionoszféra ionsűrűségének anizotrópiájával kapcsolatba hozható.

Tekintsünk el a levezetéstől. Ez jó közelítéssel /8/-al azonos eredményre vezet.

/8/ kifejezés szerint a horizontális vezetőképesség tenzorát megkapjuk három tenzor szorzataként. A gyakorlati tellurikus feldolgozási munka nyelvén ez azt jelenti, hogy a mágneses térerősség abszolút ellipsziséét 90°-al el kell forgatnunk az elektromos tér iránya felé és meg kell határozni a tellurikus térerősségre vonatkoztatott relatív ellipsziséét.

## Az anizotrópia-ellipszis gyakorlati meghatározása.

Az anizotrópia-ellipszis kiszámítására, megszerkesztésére több módszer kínálkozik. Az eddigi megfontolásaink alapján kiindulhatunk az elektromágneses tér iránysajátságait statisztikusan meghatározó abszolút-ellipszisekből. Megszerkeszthetjük ezen kívül a tellurikában alkalmazott ellipszis-szerkesztés analógiájára egyedi változásokból is.

## 1. Anizotrópia-számítás az abszolút ellipszisekkel.

Az abszolút-ellipszisek paramétereinek ismeretében meghatározhatjuk a  $C' \{S\} = \{F\} \{M\} \{E\}^{-1}$  tenzor matrixát, azaz a magnetotellurikus anizotrópia-ellipszist. Az abszolút ellipszisek tenzorát pulzációknál első közelítésben szimmetrikusnak tekintjük /9/, és így a tenzorkomponensek az ellipszisek paramétereivel kifejezve:

$$a = A \cos^2 \alpha + B \sin^2 \alpha$$

$$b = c = \frac{A - B}{2} \sin 2\alpha$$

$$d = A \sin^2 \alpha + B \cos^2 \alpha$$

.../9/

ahol A és B az abszolút ellipszisek tengelyei,  $\alpha$  a nagytengely irány-szöge.

$\{S'\} = C \{S\}$  matrixa, ha  $a_E, b_E, c_E, d_E$ -vel jelöljük az  $\{E\}$  tellurikus térerősségtenzor komponenseit és  $a_{FM}, b_{FM}, c_{FM}, d_{FM}$ -el az  $(\{F\} \{M\})$  tenzor komponenseit:

$$(S') = \begin{pmatrix} \frac{a_{FM} d_E - b_{FM} c_E}{t_E} & \frac{b_{FM} a_E - a_{FM} b_E}{t_E} \\ \frac{c_{FM} d_E - d_{FM} c_E}{t_E} & \frac{d_{FM} a_E - c_{FM} b_{FM}}{t_E} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_s & b_s \\ c_s & d_s \end{pmatrix}$$

.../10/

ahol  $t_E = a_E d_E - b_E c_E$

.../11/

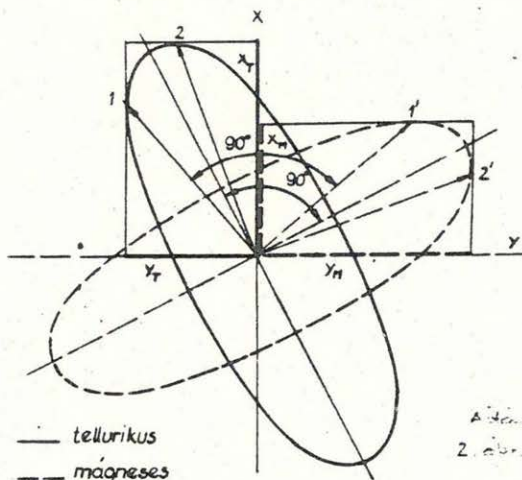
azaz a tellurikus abszolút ellipszis területe.

/10/-ből az anizotrópia-ellipszis paraméterei kiszámíthatók.

## 2. Anizotrópia-ellipszis meghatározása egyedi változások alapján és az eddigi számítási módszerek kritikája.

A földi elektromágneses tér pc típusu pulzációit jó közelítéssel szinuszos jellegűnek tekinthetjük. Ha a két komponens között fázis-  
t

lás van, a tér elliptikus polarizációt mutat. Izotróp homogén közeg mellett egyetlen pulzációhoz tartozó mágneses és tellurikus abszolút-ellipszisek tengelyei merőlegesen egymásra, excentricitásuk megegyezik /2. ábra/. Anizotróp közegben az ellipszisek tengelyei  $90^\circ \pm \alpha$  szöget



2. ábra. Összetartozó mágneses és tellurikus abszolút ellipszisek és vektorpárok homogén, izotróp közegben:  $\vec{1}$   $\vec{1}'$ ,  $\vec{2}$   $\vec{2}'$ .

zárnak be, excentricitásuk különböző /3. ábra/. A szokásos számítási eljárás alapját

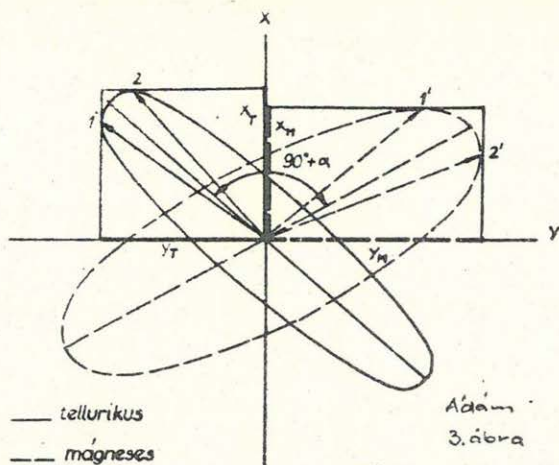
$$\frac{M_x}{E_y}, \frac{M_y}{E_x} \quad \dots/12/$$

hányadosok képezik. Ez izotróp homogén viszonyok mellett helyes, mert mindenkor az egymásnak megfelelő mágneses és tellurikus vektorok komponenseit állítja szembe egymással a mágneses és tellurikus tér

$$\begin{aligned} M_x &= -a E_y \\ M_y &= a E_x \end{aligned} \quad \dots/13/$$

kapcsolatát kifejező egyenletrendszer szerint.  $E_x$  és  $E_y$ , ill.  $M_x$  és  $M_y$  a kiértékelésnél rendszerint az 1. és 2. képletben megadott térerősségek komponenseinek amplitúdói, tehát az abszolút ellipszisek x. ill. y irányu érintési távolságai.





3. ábra. Összetartozó mágneses és tellurikus abszolút ellipszisek anizotróp közegben. A szerkesztésre használt vektorpárok  $\vec{1}$  és  $\vec{1}'$ , illetve  $\vec{2}$  és  $\vec{2}'$ .

Anizotrópiánál /L. a 3. ábrát/ a fenti feldolgozási módszerrel több hibát követünk el, éspeedig:

a./ A fázistolás /excentricitás különbség,  $\varphi$  érték/ következtében az  $E_{\max}$  nem felel meg  $M_{\max}$ -nak, illetve  $E_{\max} M_{\max}$ -nak, tehát nem egyidejű és egymásnak megfelelő mennyiségek kapcsolatát vizsgáljuk. Hibát okoz természetesen minden olyan fázistolás, amely nem a közeg anizotróp sajátjaival kapcsolatos, így pl. a mérőrendszer induktivitásából származó fázistolás.

b./ Az

$$(FM)_x = M_y = a_s E_x + b_s E_y$$

$$(FM)_y = -M_x = c_s E_x + d_s E_y \quad \dots/14/$$

egyenletrendszer szerint egy-egy mágneses és tellurikus komponens hányadosából a két tér kapcsolatát jellemző mennyiségeket nem lehet meghatározni.  $a_s$  és  $d_s$  tenzorkomponens hibája függ a vektorok irányától. Ha a térerősségvektorok a választott koordinátarendszer tengelyeinek közelében helyezkednek el, azaz az egyik komponens aránytalanul kicsi és így elhanyagolható, a fenti hányadosok kis hibával megadják az anizotrópiaellipszis két tengelymetését. A keresett tenzorkomponensek /14/-ből kifejezve:



$$a_s = \frac{M_y}{E_x} - b_s \frac{E_y}{E_x}$$

$$d_s = - \frac{M_x}{E_y} - c_s \frac{E_x}{E_y}$$

.../15.

ahol a jobboldal második tagja jelenti a keresett hibát. Mint látjuk, mindenkor a két tellurikus komponens arányától, tehát a térorösségvektor irányától függ.

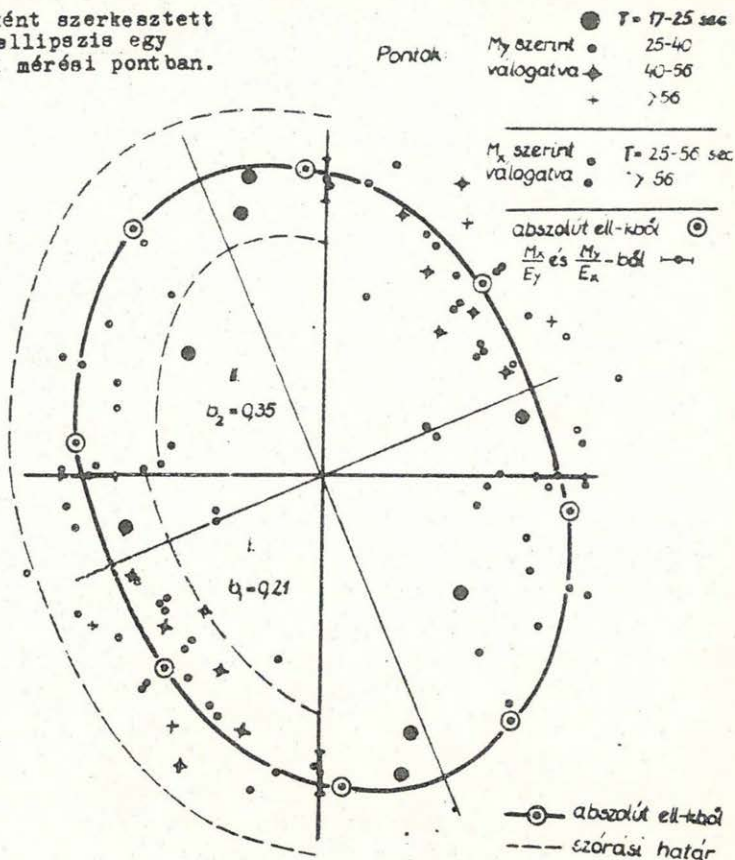
A fenti megfontolásokból jó részt adódnak a pontonkénti anizotrópia-ellipszis szerkesztésének lényegesebb követelményei. Nem a komponensek, hanem az összetartozó mágneses és tellurikus vektorok abszolút értékének hányadosát kell képezni, és az ezzel arányos hosszszat kell felrakni az S anizotrópia meghatározásakor a mágneses térorösségvektor irányára.

Tekintettel arra, hogy a mágneses és tellurikus komponensek közötti fázistolások figyelembevétele mind műszer- /észlelés-/ technikailag, mind pedig a mérési anyag feldolgozásánál megnehezíti a munkát, megkíséreltük a fent támasztott követelmény bizonyos leegyszerűsítését. A fázistolások elhanyagolása mellett alapul választva hol az egyik, hol a másik komponens szélső értékeit olvastuk ki mind a tellurikus, mind a mágneses felvételen a két-két komponens változásait. Így a 3. ábrán látható 1, illetve 1' vagy a 2, illetve a 2' vektorokat kaptuk, mint összetartozó párokat. Ilyen vektorpárok hányadosai szolgálhatnak az anizotrópia-ellipszis megszerkesztésének alapjául. Természetesen a feldolgozási munka egyéb nehezen kiküszöbölhető hibaforrásai, mint pl. a kiolvasási pontatlanság, periódusingadozás mellett ez az elhanyagolás is az ellipszispontok szóródásához vezet. Ezzel a módszerrel kaptuk a 4. ábrán látható pontrendszert. A berajzolt ellipszis abszolút ellipszisekkel végzett számításokból származik. Az x és y tengelyen megjelöltük a  $\sqrt{12}$  hányadosokból kapott értékeket középhibájukkal együtt. A különböző perióduscsoportokhoz tartozó pontok jelölése is más. A szórás megegyezik kb. 40-50 km-es bázistávolság mellett szerkesztett tellurikus relativ elipszis szórásával.

#### A magnetotellurikus anizotrópia-ellipszis jelentősége.

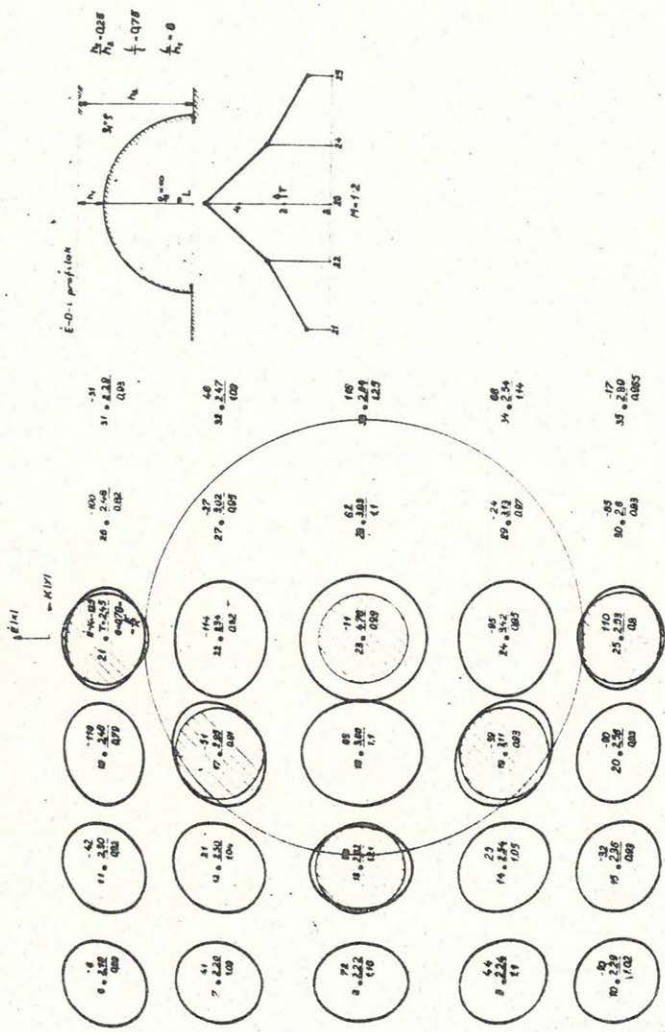
A magnetotellurikus anizotrópia-ellipszis jelentősége abban van, hogy egyedül a mérési pont alatti elektromos rendellenességeket fejezi ki. Ilyen anizotrópia-ellipszist a magnetotellurika alkalmazása előtt

4. ábra. Pontonként szerkesztett anizotrópia-ellipszis egy Sopron környéki mérési pontban.



csak költséges eljárással, mégpedig a mesterséges térrel dolgozó vertikális elektromos ellenállás körszondázással kaphattunk. A tellurika különböző ellipszisei mind valamilyen eredő hatást fejeznek ki. A leggyakrabban használt "relatív ellipszis" nevében hordja tulajdonságait: egy mozgó és egy bázisállomás elektromos anizotrópiájának kapcsolatát adja. A különböző nevű abszolút ellipsziseket a felső légkör elektromos irányajáságai terhelik. Kétségtelen, hogy sok adat esetén a felső légkör hatásának időbeli változásai nagy munkával kiszűrhetők, az eredmény még sem egyezik teljesen az abszolút anizotrópia-ellipszissel, amelyet rövid regisztrálás alapján szerkesztünk. A 5. ábrán tellurikus modellkísérletünk /8/ egyik eredményét mutatjuk be. Ezzel kívánjuk érsékelteni, hogy a fenti módszerrel meghatározott anizotrópia-ellipsziseknek milyen geológiai szerkezetjelző tulajdonságuk van.

Félgömbölkü szerkezet ellipszisrendszere.



5. ábra. Félgömbölkü szerkezet ellipszisrendszere. /Modelkísérlet/



## HIVATKOZOTT IRODALOM

- 1./ M.N. Berdicsevszkij: Elektriceseszkaia razvedka metodom telluriceseszkih tokov.  
/Gosztoptehizdat, 1960./
- 2./ N.V. Linszkaja, N.A. Deniszkin, Ju.M. Jegorov: Rezoltatü elektromagnitnovo zondirovanija v centralnoj oblaszti dneprovoszko-doneckoj vpadina.  
/Izvesztija AN.SzSzSzR 1961.No.3./
- 3./ N.P. Vladimirov, N.N. Nikiforova: K metodike interpretácii krivüh magnitotelluriceseszskovo zondirovanija.  
/Izvesztija AN.SzSzSzR 1961.No.1./
- 4./ B.E. Brjunelli, M.N. Berdicsevszkij, A.M. Alekszejev, O.A. Burdo: Nabljudenija korotkoperiodiceseszkih variacij elektromagnitnovo polja zemli.  
/Izvesztija AN.SzSzSzR. 1959.8./
- 5./ Cagniard: Electricité tellurgique.  
/Handbuch der Physik, Bd. XLVII./
- 6./ G. Porstendorfer: Tellurik, Grundlagen, Messtechnik, und neue Einsatzmöglichkeiten.  
/Freiberger Forschungshefte, C 107, 1961./
- 7./ M.N. Berdicsevszkij; B.E. Brjunelli: Teoreticeseszkiye predposzülki magnetotelluriceseszskovo profilirovánija.  
/Izvesztija A.N.SzSzSzR. 1959.7./
- 8./ A. Ádám: Über Erdstrommodellversuche.  
/Freiberger Forschungshefte C 100. 1960./
- 9./ J. Veró: Die Bestimmung der tellurischen Stationsellipsen.  
/Gerlands Beiträge zur Geophysik 69. Hf. 5. 1960./