

# Ráfúrásos technikával végzett kőzetfeszültség-mérések Magyarországon<sup>1</sup>

GERNER PÉTER<sup>2</sup>, PORJESZ RÓBERT<sup>3</sup>, SZAFIÁN PÉTER<sup>3</sup>

Hazánkban néhány éve történtek az első sikeres mérések a földkéreg jelenkori feszültségének vizsgálatára. Az alkalmazott módszerek közül a ráfúrásos kőzetfeszültség-mérések elméleti hátterét, a különböző helyszíneken történt méréseket, azok feldolgozását és eredményeit ismertetjük.

A ráfúrásos technikával végzett mérés során a szálkőzetben egy néhány méter mély fúrólyukból 10–20 centiméter hosszú magot vettünk, majd egy megnyúlásmérő cella segítségével megmértük a kőzetben uralkodó feszültség hatása alól felszabadult mag deformációját. Ebből a kőzet rugalmassági állandóinak segítségével a feszültségértékek és irányok kiszámolhatóak voltak.

Először a karlsruhei egyetem kutatóival együttműködve Ugodon, Beremenden és Miskolcon, majd önállóan a tatai Kálvária-dombon és a Szabadbattyán melletti kőszárhegyi kőbányában végeztünk ráfúrásos feszültségméréseket. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a ráfúrásos technika igen érzékeny a morfológiai–szerkezeti viszonyokra és a kőzetminőségre. Azonban ezek figyelembe vételével értékes, a földkéreg feszültségi állapotára, valamint a horizontális síkban ható két főfeszültség irányára vonatkozó adatokat kaptunk.

**P. GERNER, R. PORJESZ, P. SZAFIÁN: In Situ Stress Measurements in Hungary Using Overcoring Technique**

*The first successful measurements to determine the recent stress field in the Earth's crust in Hungary have been carried out for only a few years. Different methods have been used for this purpose. In this paper the theoretical background of the overcoring technique, the description of the test sites, the processing of the data and the results of the measurements are discussed.*

*In the overcoring technique the strain relaxation of a 10–20 cm long core sample removed from the in situ stress field is measured with a strain gauge cell. If the elastic properties of the rock are known, the magnitudes and the directions of the in situ stresses can be determined.*

*The first three measurements (Ugod, Beremend, Miskolc) were carried out in a cooperation with the researchers of the Karlsruhe University then two more sites (Tata and Szabadbattyán) were tested without their participation. The results show that the overcoring technique is very sensitive to the properties of the rock, the morphology and the geological structure of the site. However, considering these observations, valuable conclusions can be drawn concerning the recent stress field of the Earth's crust and the direction of the two horizontal principal stresses.*

## Bevezetés

A litoszféra felső részének feszültségállapotát többféle, egymástól jelentősen eltérő módszerrel lehet vizsgálni. A különböző eljárások alkalmazásával lehetőség nyílik a feszültségtér mind teljesebb megismerésére és elkerülhető az egyes módszerek hibáiból adódó helytelen értelmezés is. A jelenkori feszültség mérésére szolgáló módszerek összehasonlítását és csoportosítását ZOBACK és ZOBACK [1980] valamint GOUGH és GOUGH [1987] végezték el.

A nyolcvanas évek végén a Nemzetközi Litoszféra Program keretében került sor a *World Stress Map Project* megszervezésére, melynek célja a feszültségmérési adatok rendszerezése és a földkéreg jelenkori feszültségi állapotát bemutató térkép készítése [ZOBACK et al. 1989, ZOBACK 1992]. A szerkesztők egy minősítési rendszer alapján osztályozzák a térképre kerülő adatokat, mely rendszernek a fúrólyukakban történt feszültség-meghatározásokra vonatkozó részét az 1. táblázat mutatja be.

Hazánkban ehhez a programhoz kapcsolódva indultak meg az ELTE Geofizikai Tanszékén — a karlsruhei Fridericana Egyetem Geofizikai Intézetének közreműködésével — a Pannon medencében uralkodó feszültségtér meghatározására irányuló mérések. A különböző eljárások közül a cikk írásáig a ráfúrásos feszültségmérési technikát, földrengések fészekmechanizmusának meghatározását és mélyfúrások faldeformáció-analízisét alkalmazták [DÖVÉNYI, HORVÁTH 1990, MÜLLER et al. 1992].

A ráfúrásos technika (overcoring technique) a legkorábban kialakult és széleskörűen elterjedt módszer [LEEMAN 1964, SCHEIDEGGER 1980], amely a teljes feszültségtenzor meghatározására alkalmas. Segítségével megadható a feszültségtér jellege (extenziós vagy kompressziós), amelyet más módszerrel csak közvetett úton vagy egyáltalán nem lehet meghatározni. Hátránya, hogy csak a felszíntől számított néhány méteres mélységben, illetve bányákban és alagutakban használható.

## A mérés elméleti alapjai

A ráfúrásos feszültségmérések közül Magyarországon a biaxiális és a triaxiális technikát alkalmaztuk. A biaxiális technikát a mérőcella alakjáról gyak-

<sup>1</sup> Beérkezett: 1993. szeptember 1-jén

<sup>2</sup> Magyar Állami Földtani Intézet, H-1442 Budapest, Pf. 106

<sup>3</sup> ELTE Geofizikai Tanszék, H-1083 Budapest, Ludovika tér 2.

A	B	C	D
mélység > 200 m szórás < 12° két vagy több fúrólukban	mélység > 100 m szórás < 20° két vagy több fúrólukban	mélység > 10 m szórás < 15° két vagy több fúrólukban	mélység < 10 m szórás > 15° egy lyukban tör- ténő mérés

1. táblázat. A fúrólukokban történő feszültségmérések minősítési rendszere [ZOBACK 1992]

Table 1. Classification of the in-situ stress measurements in boreholes [ZOBACK 1992]

ran „doorstopper”-nek nevezik. A doorstopper eljárással a fúróluk tengelyére merőleges síkban lehet a feszültségek nagyságát és irányát meghatározni. Triaxiális szondával történő méréskor a feszültség-tenzor minden eleme számolható, ugyanakkor jóval komolyabb technikai felszerelés és szigorúbb terepi feltételek szükségesek, mint a biaxiális eljárásnál. Ezt a módszert mindössze egy helyszínen alkalmaztuk, így a továbbiakban csak a biaxiális technikát ismertetjük.

ANDERSON [1951] alapján általánosan elfogadott, hogy a földkéregben az egyik főfeszültségi irány gyakran a helyi függőleges. Így ha egy függőleges fúróluk alján történnek a méréseink, akkor a két horizontális főfeszültség irányát és nagyságát tudjuk meghatározni, mely összesen három független adatot jelent.

A mérés során a gondosan kiválasztott helyszínen egy néhány méter mély fúrólukat mélyítünk és talpára egy speciális megnyúlásmérő cellát ragasztunk. Ezután történik a ráfúrás, amikor is úgy veszünk magot a kőzetből, hogy a szonda is rajta van. Ezután a felszínen megmérjük a feszültségtér hatása alól kikerült mag deformációját — legalább három különböző irányban —, majd a kőzet rugalmassági állandóinak ismeretében a feszültségirányok és nagyságok kiszámolhatók [LEEMAN 1971].

Számításaink során feltételezzük, hogy a vizsgált kőzettest rugalmas tulajdonságait az általánosított Hooke-törvény írja le, tehát a kőzetre jellemző Poisson-szám ( $\nu$ ), Young-modulus ( $E$ ) és az

$$\underline{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{xy} & \epsilon_{yy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

deformációs tenzor ismeretében a

$$\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{pmatrix} \quad (2)$$

feszültségi tenzor kiszámolható:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\mu + \lambda & \lambda & 0 \\ \lambda & 2\mu + \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 2\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

ahol  $\mu$  és  $\lambda$  a Lamé-féle állandók:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (4)$$

A  $\sigma_{yz}$  és a  $\sigma_{zx}$  nyírófeszültségek nem jelennek meg az egyenletekben, mivel ezek az  $X$  és  $Y$  tengely körül forgatják a síkot, amelyet a síkra ragasztott megnyúlásmérő cella nem érzékel.

A Young-modulust és a Poisson-számot egytengelyű kompressziós kísérlettel határozzuk meg [JAEGER, COOK 1976]. Ennek során egy henger alakú min-

tadarabot kompressziós erőhatásnak vetünk alá és az erő függvényében mérjük a minta alakváltozását. A Young-modulus a  $\sigma$ - $\epsilon_h$  (feszültség-hosszirányú relatív megnyúlás) függvény, a Poisson-szám pedig az  $\epsilon_k$ - $\epsilon_h$  (keresztirányú relatív megnyúlás-hosszirányú relatív megnyúlás) függvény lineáris szakaszának meredeksége (1. ábra).

Az  $\epsilon$  deformációtenzor komponenseit terepi mérésekből számítjuk ki. Ha három adott irányban ( $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ , 2. ábra) ismerjük a relatív megnyúlást ( $m_1, m_2, m_3$ ), akkor a deformációtenzor elemeit az origóban az (5) egyenletrendszerből kapjuk meg [LEEMAN 1971]:

$$\begin{aligned} m_1 &= \epsilon_{xx} \cos^2 \Phi_1 + \epsilon_{yy} \sin^2 \Phi_1 + \epsilon_{xy} \sin \Phi_1 \cos \Phi_1 \\ m_2 &= \epsilon_{xx} \cos^2 \Phi_2 + \epsilon_{yy} \sin^2 \Phi_2 + \epsilon_{xy} \sin \Phi_2 \cos \Phi_2 \\ m_3 &= \epsilon_{xx} \cos^2 \Phi_3 + \epsilon_{yy} \sin^2 \Phi_3 + \epsilon_{xy} \sin \Phi_3 \cos \Phi_3 \end{aligned} \quad (5)$$

ahol

$m_1, m_2, m_3$ : az 1, 2, 3 megnyúlásmérő cella által mért relatív megnyúlás,

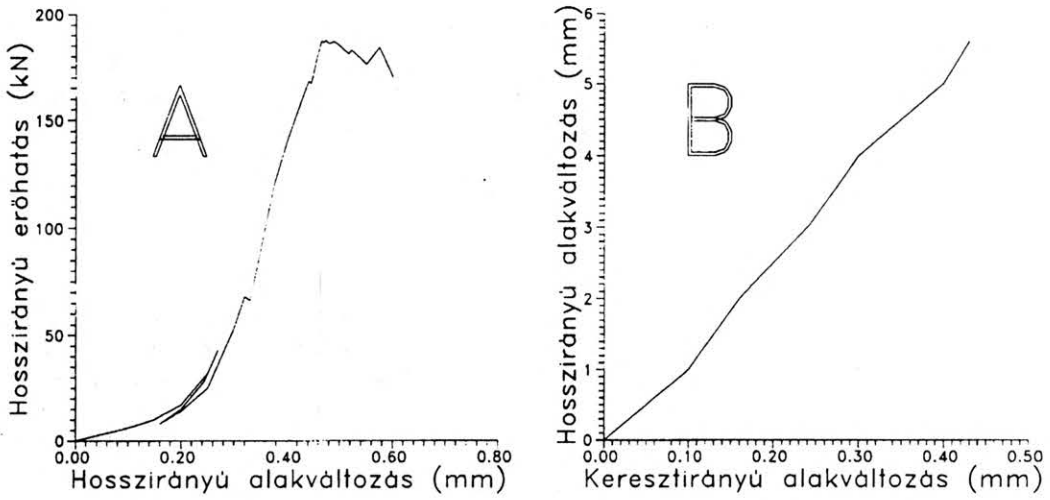
$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$ : az  $X$  és  $Y$  irányú megnyúlás,

$\epsilon_{xy}$ : tangenciális megnyúlás az origóban.

Az érzékelő cella négy, egymástól 45°-ra fekvő irányban méri a mag deformációját. Így három ismeretlenre négy adat jut, tehát az (5) egyenletrendszer túlhatározott. A négy adatból hármat kiválasztva — ez négy különféle módon történhet — a rugalmassági állandók és az  $\underline{\epsilon}$  tenzor ismeretében a  $\underline{\sigma}$  feszültség-tenzor kiszámítható. Ha az így kapott irányok szórása 15° alatti, akkor az átlagok jelenti a mérési eredményt, ellenkező esetben a mérés nem fogadható el.

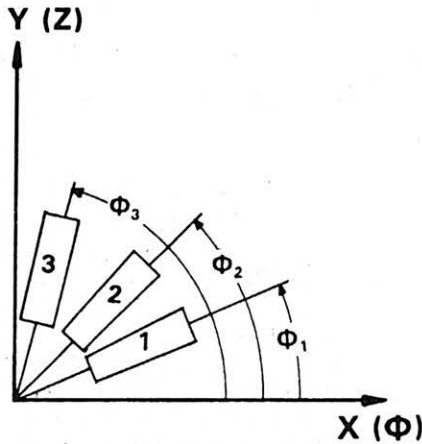
Számításaink során azt is figyelembe kell venni, hogy a fúróluk alja nem pontosan tükrözi a kőzetben uralkodó feszültségállapotot (3. ábra). A probléma megoldására még nem dolgoztak ki analitikai megoldást, ám laboratóriumi kísérletekkel [BONNECHERE, FAIRHURST 1968, VAN HEERDEN 1968] valamint végeselemes modellezéssel [CROUCH 1969] tapasztalati összefüggéseket állítottak fel a kőzetben és a fúróluk alján ható feszültségek kapcsolatára [LEEMAN 1971]:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^* &= A\sigma_{xx} + B\sigma_{yy} + C\sigma_{zz} \\ \sigma_{yy}^* &= A\sigma_{yy} + B\sigma_{xx} + C\sigma_{zz} \\ \sigma_{xy}^* &= D\sigma_{xy} \end{aligned} \quad (6)$$



1. ábra. Rugalmassági állandók meghatározása. A: A függőleges tengelyen a hosszirányú erőhatás, a vízszintesen a hosszirányú alakváltozás van feltüntetve. A Young-modulus a grafikon lineáris szakaszának meredekségeként olvasható le. B: A függőleges tengely a hosszanti irányú, a vízszintes tengely a keresztirányú alakváltozást mutatja. A Poisson-szám ennek a görbének a meredeksége. [GERNER 1991 nyomán]

Fig. 1. Determination of elastic constants. A: The Young-modulus is the ratio of tensional stress (vertical axis) to the resultant longitudinal strain (horizontal axis). B: The Poisson's ratio is determined as the ratio of the fractional lateral contraction (horizontal axis) to the fractional longitudinal extension (vertical axis). [After GERNER 1991]



2. ábra. A megnyúlásmérő cellák általános elhelyezkedése [LEEMAN 1971 nyomán]

Fig. 2. General strain gauge configuration [After LEEMAN 1971]

Az egyenletrendszerben a jelölések — amelyek megegyeznek az 3. ábrán használtakkal — a következők:

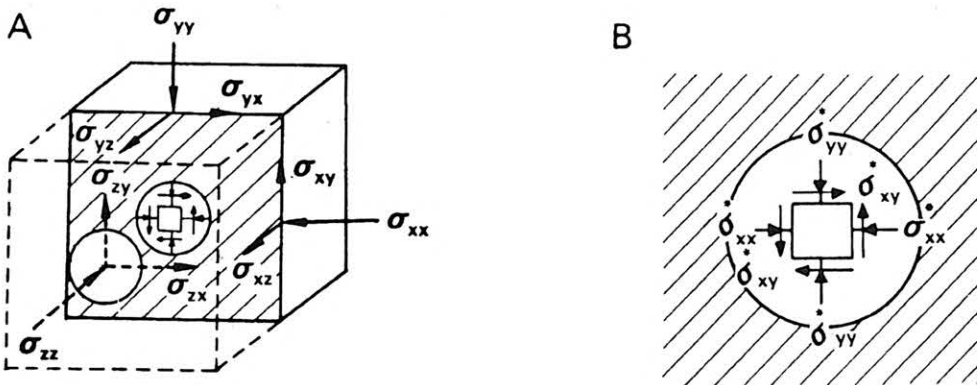
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}$ : a kőzetben uralkodó feszültségek,

$\sigma^*_{xx}, \sigma^*_{yy}, \sigma^*_{xy}$ : a fúróluk alján ható feszültségek,

A, B, C, D: korrekciós faktorok.

A korrekciós faktorokra a szerzők eltérő értékeket határoztak meg, amelyeket a 2. táblázatban foglaltunk össze.

Miután a (6) egyenletrendszer átrendezésével kiszámoltuk a fúrás aljának síkjában ható főfeszültségek nagyságát, a Mohr-kör szerkesztési elvei alapján meghatározható irányuk is [MEANS 1976].



3. ábra. A: A kőzettömeg egy pontjában ható feszültségek rendszere, B: A fúróluk alján ható feszültségek (az A ábra kinagyított részlete). [LEEMAN 1971 nyomán]

Fig. 3. A: The stress system at a point in the rock mass, B: The stresses on the flattened end of a borehole (enlargement from A). [After LEEMAN 1971]

	BONNECHERE	VAN HEERDEN	CROUCH
A	1,025	1,25	1,35-1,55v
B	0	0	0
C	-0,75(0,5+v)	-0,75(0,65+v)	-0,81(0,562+v)
D	1,25	1,25	—

2. táblázat. A (6) egyenletrendszerben szereplő korrekciós faktorok [LEEMAN 1971 nyomán]

Table 2. Correction factors in (6) [after LEEMAN 1971]

## A helyszínek kiválasztási szempontjai és a mérések végrehajtása

A helyszínek kiválasztása a következő szempontok alapján történt [DÖVÉNYI et al. 1988]:

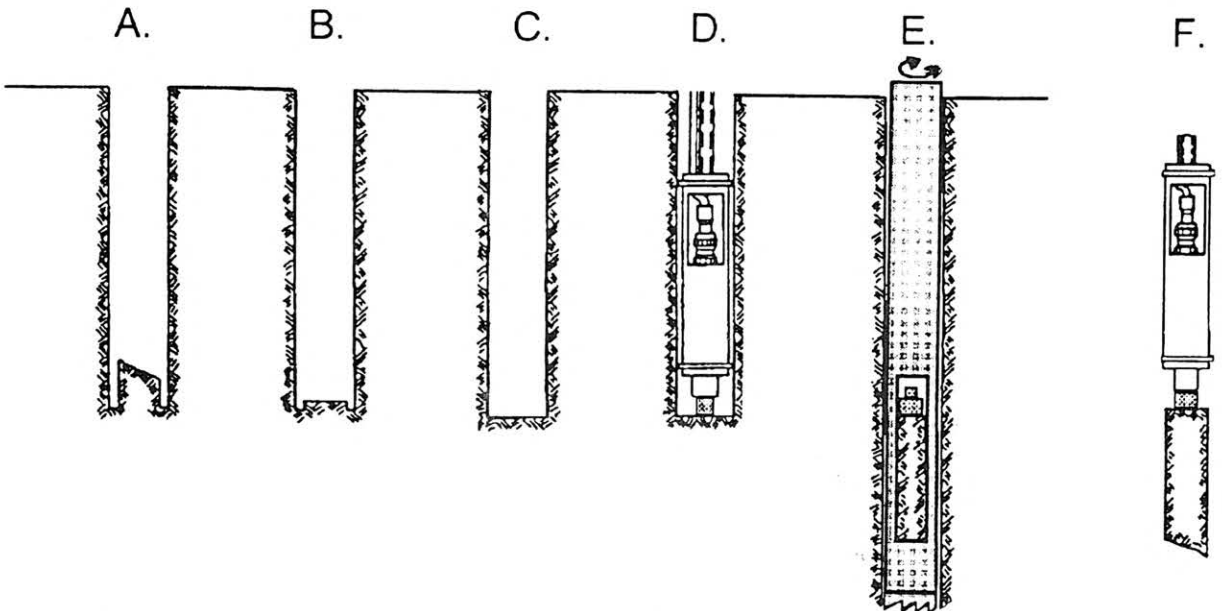
- a mérés csak finomszemcsés, üde kőzetben végezhető el, mert durvaszemcsés kőzetben a szonda a szemcsék közötti feszültségkülönbséget mérné. Ügyelni kell arra, hogy a kőzet ne legyen összetöredezett s porozitása is minél kisebb legyen. Zárt repedéskitöltés azonban nem zavarja a mérést. A rétegvastagságnak legalább 10 centiméteresnek kell lennie és a szálkőzetnek minimum egy négyzetméteren a felszínre kell bukkannia, mivel ekkora terület szükséges a fúróberendezés szilárd rögzítéséhez. Magas kvasav-tartalmú kőzetben a fúrás nehezen végezhető el. Mindezek alapján a mikrites, vastagon rétegzett mészkő tűnik a legalkalmasabbnak a mérésre.

— A megnyúlásmérő cellát csak száraz kőzetre tudjuk felragasztani, ezért a talajvízszint nem érheti el a fúrás talpmélységét. Bármilyen tartós vízbeszivárgás, illetve visszafolyás is megakadályozza a mérést.

— A mérés során azt is biztosítanunk kell, hogy ne a környék morfológiájának hatására kialakuló lokális feszültségteret mérjük, hanem a tektonikai eredetű regionális feszültséget. Ezért a mérési helyszín nem lehet hegycsúcsban vagy völgyben, a kőbányákban pedig a bányafaltól legalább a fal magasságával megegyező távolságban mértünk. Kerülendők a karsztos területek is, ahol a felszín alatti üregek eltorzíthatják a regionális feszültségteret.

A helyszín kiválasztása után a fúróberendezést stabilan rögzítjük és úgy állítjuk be, hogy a fúrás függőlegesen haladjon. A berendezés lebontását csak a lyukban tervezett összes mérés elvégzése után lehet megtenni, mert egy felhagyott fúrólyukra már nem lehet visszaállni. A fúrás 76 milliméteres átmérővel, folyamatos magmintavétellel történik. A berendezés hűtéséhez vizet használunk. Ha a kívánt mélység elérésekor (minimum két méter) a mag vizsgálatából arra következtetünk, hogy a kőzet nem alkalmas a mérésre, akkor magmintavétellel továbbfúrunk.

Ha a kőzetet alkalmasnak találjuk a mérésre, akkor a fúrófej cseréje után néhány centimétert teljes szelvényvel fúrunk, hogy a talp egyenetlenségeit elsimítsuk, majd a lyuk alját polírozzuk (4a-c. ábra). Erre azért van szükség, hogy a szonda teljes felületével a kőzetre fekdjön. Ezután a lyukat megtisztítjuk és kiszáritjuk. Csak a fúrólyuk kiszáritása után lehet eldönteni, hogy a kőzet valóban alkalmas-e a mérésre. Amennyiben a polírozott felszínen bármilyen ap-

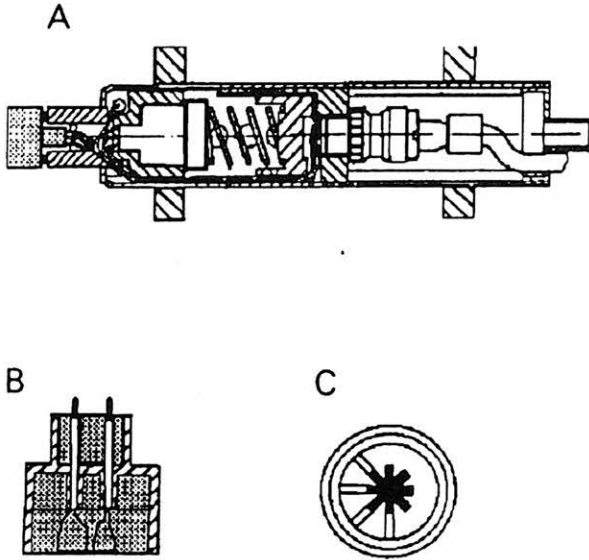


4. ábra. A ráfúrásos feszültségmérés főbb szakaszai. A: Fúrás a megfelelő mélységig és kőzetig, B: a lyuk talpának lecsiszolása, C: polírozás, D: a nyúlásmérő cella felragasztása és a referenciamérés, E: ráfúrás, F: a mag kiemelése és a relaxációs mérés [LEEMAN 1971 nyomán, módosítva]

Fig. 4. The process of the overcoring stress measurements. A: Boring to the suitable depth and rock, B-C: polishing of the bottom of the hole, D: sticking of the gauge and the reference measurement, E: overcoring, F: removing of the core and the relaxation measurement [modified after LEEMAN 1971]

ró repedés látszik, folytatjuk a fúrást, ugyanis a ráfúrás során a repedésnél a kőzet eltörhet és a mérőcella meglazul. Ha a talpon nem látszik repedés, akkor megkezdjük a mérést.

A szonda (5a-b. ábra) aljához csatlakoztatjuk a cellát, amelynek talpán négy vezetékszál helyezkedik el, melyek egymással 45°-os szöget zárnak be (5c. ábra). Ezen vezetékek ellenállásváltozása arányos megnyúlásukkal, illetve rövidülésükkel. A szondához kapcsolódó mérőműszer — mely ellenállást mér — már a cella vezetékeinek hosszváltozását mutatja ki  $\mu\text{m}/\text{m}$ -ben.



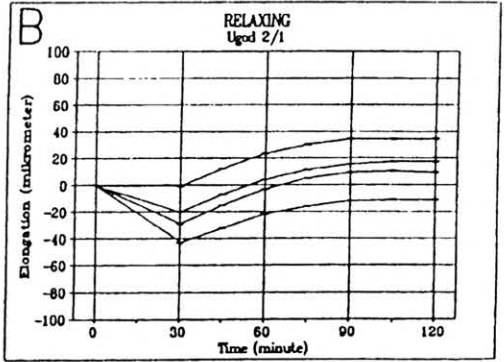
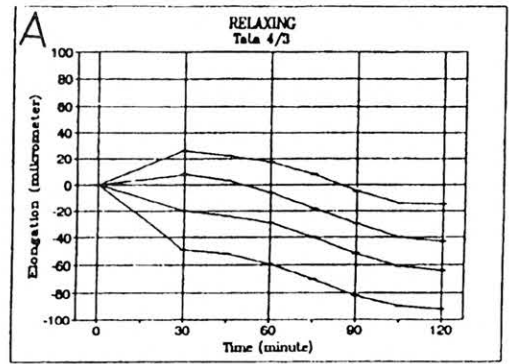
5. ábra. A méréshez használt szonda (A) és a megnyúlásmérő cella (B) oldalnézeti képe, valamint a cella talpa (C). A szonda bal oldalához csatlakozik a megnyúlásmérő cella, amelyet a mérés során a fúróluk talpára ragasztunk. A szondában hőmérséklet-kompenzációt biztosító kőzetmintát és cellát is elhelyeztünk

Fig. 5. Side view of the installing tool (A) and the strain gauge cell (B), (C): the bottom of the strain cell. The strain cell, which will be glued onto the bottom of the hole during the measurement, is plugged in the end of the installing tool. There are a strain gauge cell and a rock sample in the installing tool assures the temperature compensation

A szondát a tetejéhez csatlakoztatott alumíniumrudak segítségével bocsátjuk le a lyukba, ahol a mérőcellát a kőzetre ragasztjuk (4d. ábra). A mérés megkezdése előtt a szondát — s így a cellát is — az északi irányhoz tájoljuk, majd a rudazatot rögzítjük. Ezután kezdődik a referenciamérés, amelyet a ragasztó megszilárdulásáig (1-1,5 óra) 15 percnként végzünk. Célja a ráfúrás előtti alapállapot megismerése.

A ragasztó megszilárdulása után kihúzzuk a szondát a fúrólukból. A felragasztott mérőcella ekkor leválk a szondáról és a kőzethez tapadva marad. Ezután kerül sor a ráfúrásra, amikor egy 15-20 centiméteres magot fúrunk (4e. ábra).

A kivett mintát — rajta az érzékelő cellával — csatlakoztatjuk a szondához és megkezdjük a relaxációs mérést (4f. ábra), amelynek során a mag deformációját mérjük  $\mu\text{m}/\text{m}$ -ben a minta hossz tengelyére merőleges négy irányban. Az alakváltozás egy-másfél óra alatt végbemegy, a mért értékek stabilizálódnak, a mérés befejeződik (6. ábra).



6. ábra. Relaxációs mérés adatai egy tatai (A) és egy ugodi (B) mintán. A tatai minta a ráfúrás után összehúzódott, tehát eredeti helyén extenziós feszültségtérben helyezkedett el. Az ugodi minta viszont három irányban tágult, vagyis kompressziós közegeből származik. [GERNER 1991 nyomán] Fig. 6. Relaxation measurements on samples from Tata (A) and Ugod (B). After the overcoring the Tata sample contracted while the Ugod sample showed extension in three directions. These measurements indicate that the in-situ stress field is extensional in Tata and compressional in Ugod. [After GERNER 1991]

## A hazai mérések helyszínei, adatai és értelmezése

A mérési eredmények értelmezésénél a jegyzőkönyvben rögzített, a mérést befolyásoló körülményeket, illetve a mérési adatok kiértékelésekor kapott eredményeket is figyelembe vettük. Ezek alapján egyes adatok kimaradtak az értékelésből, mások súlya megnőtt. Az egyes mérések értékét csökkentette:

- mérésen belül 15°-nál nagyobb szórás,
- vékony, törött vagy aszimmetrikus mag,
- az átlagtól jelentősen eltérő feszültségirány vagy érték,
- hidrosztatikus (minden irányban azonos értékű) feszültségtér.

Hangsúlyozni szeretnénk, hogy az 1. táblázat minősítési rendszerét elfogadva a hazai feltérési viszonyok és műszerpark mellett nem lehetséges D kategóriánál jobb ráfúrásos feszültségmérést végezni, mivel a fúróberendezés legfeljebb 10 méter mélységet tud elérni. Kivételt jelenthet, ha triaxiális mérést végzünk, illetve ha mélyszerinti bányában hajtunk végre biaxiális mérést, mellyel így a magasabb kategóriák mélységre vonatkozó feltételét ki tudjuk elégíteni.

A karlsruhei egyetem szakembereinek vezetésével és segítségével három ráfúrásos feszültségmérést végeztünk (Ugod, Beremend, Miskolc), amelyek eredményeit és értelmezését BECKER [1989] valamint DÖVÉNYI és HORVÁTH [1990] közölték, így itt csak rövid összefoglalásukat adjuk.

**Ugod:** A falu Pápa felé eső végében kezdődő kis földúton haladva két kilométer után érjük el a kőfejtőt, ahol méréseinket végeztük. A 200 méter átmérőjű bányaudvar az út szintjében egy domb oldalába, nóri dachsteini mészkőbe mélyül. A kőzet vastagpados, tömött, néhol erősen bioklasztos. A rétegek dőlésszöge 20–30°. A bányaudvar déli és északi peremén két nagyobb törés található. Egy mérési pont a déli törésvonalon 7–8 méterre, kettő a törésektől nagyjából egyenlő távolságra volt. Összesen tizenöt mérést végeztünk doorstopper technikával, illetve két triaxiális mérés is történt. A kiértékelés szerint minden irányból kompressziós feszültségtér uralkodik, a nagyobb horizontális főfeszültség iránya 151–331°, szórása 18° (7A. ábra).

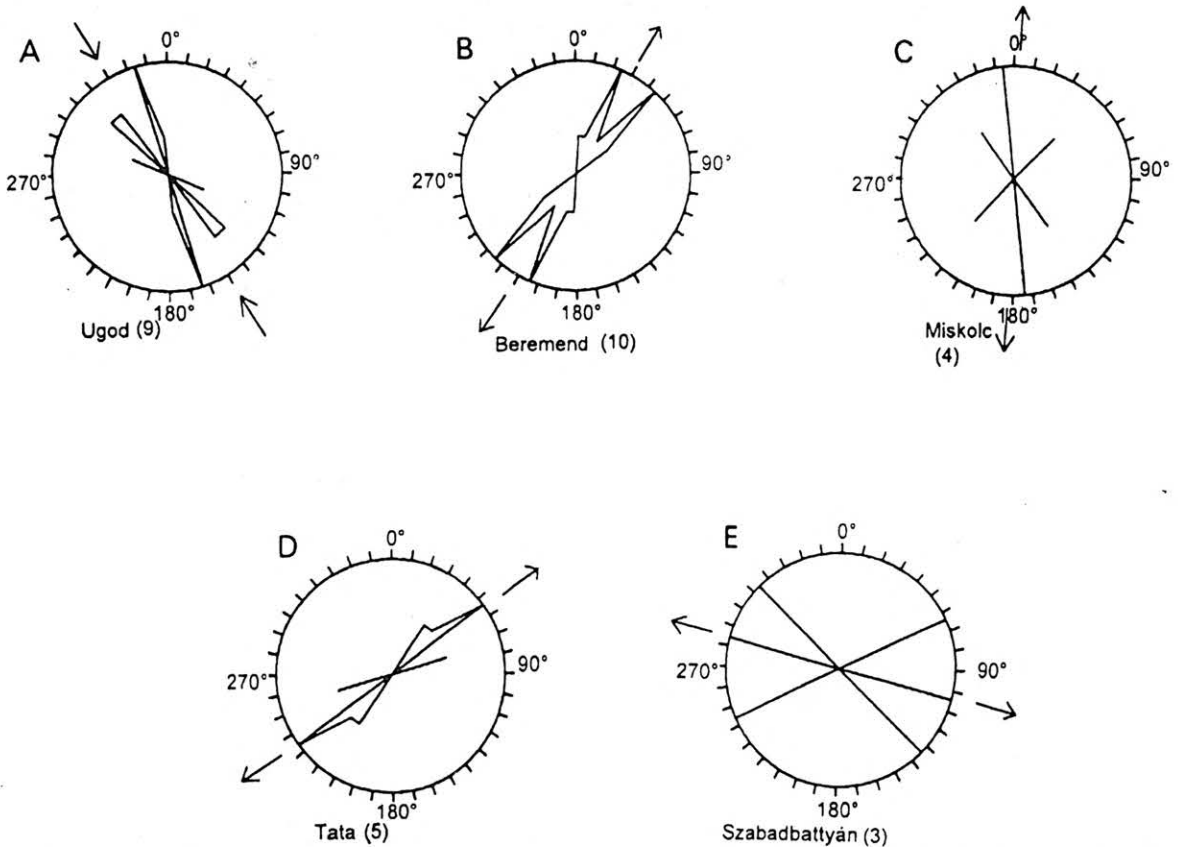
**Beremend:** A magyarbólyi elágazástól 50 méterre található a kétszintes kőfejtő bejárata. A lapos térszínen egy kisebb domb felszíne alá mélyül a bányaudvar. Földtani helyzetét tekintve a bánya a Villány-hegység legfelső pikkelyében található. A fúrásokat felső kréta korú, szürke, vastagpados, pachyodontás mészkőben végeztük. A karsztvízszint az alsó fejtési

szint alatt hat méterrel volt, így a mérést nem zavarta. Itt húsz mérést végeztünk három fúrólukban. Mindkét horizontális főfeszültségi irány tenziós jelleget mutatott, a nagyobb iránya (amely ebben az esetben a kisebb húzófeszültséget jelenti) 31–211°, szórása 15° (7B. ábra).

**Miskolc:** A Miskolctapolcára vezető út folytatásában van a nagykőmázsai mészkőbánya bejárata. Itt felső triász korú, szürke, mikrites mészkövet fejtenek. A kőzet vastagpados, palás, erősen töredezett, amelyet tovább növelt a bányaművelés során történt számtalan robbantás. Méréseink során problémát jelentett a kőzet töredezettsége mellett a bánya topográfiai helyzete is. Emiatt csak öt értékelhető mérést végeztünk, amelyek tenziós feszültségtérre jeleztek. A legnagyobb horizontális főfeszültség iránya 1–181°, szórása 33° (7C. ábra).

A következő két helyszínen szintén a karlsruhei egyetem berendezéseit használtuk, ám a német szakemberek nem vettek részt a mérések elvégzésében.

**Tata:** A mérést a Kálvária-dombon, a bekerített természetvédelmi terület melletti felhagyott mészkőbányában végeztük. A fúrásokat a rhaeti dachsteini mészkőben mélyítettük. A kőzet szürkésfehér, meg-aloduszos, tömör mészkő, amelyet néhol hasadékkitöltésként vörös, agyagos mészkő szakít meg. Itt két fúrólukban összesen tíz értékelhető mérést végeztünk, amelyeket a 3. táblázatban foglaltunk össze.



7. ábra. A mérések eredményeinek irányeloszlása. A helységnevek mögötti zárójelben a felhasznált adatok száma található. A nyilak az egyes mérések átlagának irányát mutatják. A kifelé mutató nyíl extenziót, a befelé mutató pedig kompressziót jelez. Fig. 7. The direction distributions of the results. The figures in the brackets after the site names show the number of successful measurements at each sites. The arrows indicate the average values of the measurements. The outwards orientated arrows represent extension, the inward orientated ones indicate compression

	SH <sub>max</sub>	SH <sub>min</sub>	Irány
1	1,86	-2,32	58°
2	-2,62	-6,30	12°
3	-1,42	-5,97	149°
4	-4,10	-6,51	46°
5	-3,41	-4,67	56°
6	1,73	-7,25	165°
7	0,75	-3,94	108°
8	13,45	7,85	132°
9	32,63	28,08	30°
10	-1,27	-9,55	75°

3. táblázat. A tatai mérési eredmények. SH<sub>max</sub> és SH<sub>min</sub> a legnagyobb, illetve legkisebb horizontális főfeszültség nagysága MPa-ban. Az irány SH<sub>max</sub> északkal bezárt szöge

Table 3. Results of the Tata measurements. SH<sub>max</sub> and SH<sub>min</sub> are the maximum and minimum horizontal principal stresses in MPa. The last column shows the deviation of SH<sub>max</sub> from the North

Az egyes mérések által jelzett maximális horizontális főfeszültségek irány szerinti eloszlásából látszik, hogy azok fele (az 1., 4., 5., 9. és 10. mérés) egy helyen csoportosul, így ezek átlagát ( $53-233^\circ \pm 16,5$ ) tekintettük a közetfeszültség helyi maximumának (7D. ábra).

A mérés szerint a horizontális síkban fekvő maximális főfeszültség ÉK-DNy irányú, a minimális főfeszültség pedig ÉNy-DK-i. A feszültségtér mindkét irányban extenziós jelleget mutat. Az eredmény értelmezésére kétféle lehetőség van:

- Egy regionális kiterjedésű, tektonikai eredetű feszültségprovinciára utal, amelyet azonban nem támasztanak alá az ország különböző helyein, más módszerrel meghatározott feszültségadatok.
- A tatai rögök kiemelt morfológiai helyzetéből adódó tenziós feszültséget mutatta ki a mérés. Ugyanis itt a mezozoós alaphegység kettős dombvonulatot alkot ÉK-DNy-i csapással. A nyugati szárnyán negyedidőszaki üledékekkel fedetten található egy vonulat, keleti részén van a Tatán felszínre bukkanó Kálváriadomb. Ettől keletre viszont az alaphegység 200, nyugatra pedig 50 méterrel van a tengerszint alatt [FÜLÖP 1975].

**Szabadbattyán-Kőszárhegy:** A „Mészkö” Kőbányászati Vállalat Polgárdi-Ípartelepeken működő kőbányájában végeztük a mérést. A bánya Polgárdi és Székesfehérvár között, a Kőszárhegy oldalában található. A fejtett terület csaknem 3 kilométer hosszan, több szintben tárja fel a felsőkarbon metamorf mészkövet. A kőzet vastagpadosnak, ugyanakkor töredezettnek tűnt. Az alsó bányaudvar területén összesen hét fúrólukban kíséreltük meg a mérést úgy, hogy azok lehetőség szerint távol essenek egymástól. E kísérletek közül csak két lyukban tudtunk eredményes mérést végezni, a többiben ez megghiúsult a töredezett kőzet vagy a mészkőben talált üregek miatt.

Összesen tíz értékelhető mérést végeztünk, amelyeket a 4. táblázatban foglaltunk össze.

	SH <sub>max</sub>	SH <sub>min</sub>	Irány
1	4,61	0,93	54°
2	-1,70	-4,70	23°
3	-2,45	-7,26	134°
4	-7,24	-8,66	176°
5	-4,43	-7,84	63°
6	-8,18	-9,00	31°
7	-5,11	-15,24	155°
8	-0,87	-2,56	106°
9	-8,51	-8,89	73°
10	-1,92	-5,97	7°

4. táblázat. A szabadbattyán-kőszárhegyi mérési eredmények. A jelölések magyarázata a 3. táblázatnál található

Table 4. Results of the Szabadbattyán-Kőszárhegy measurements. Explanation of the symbols at Table 3

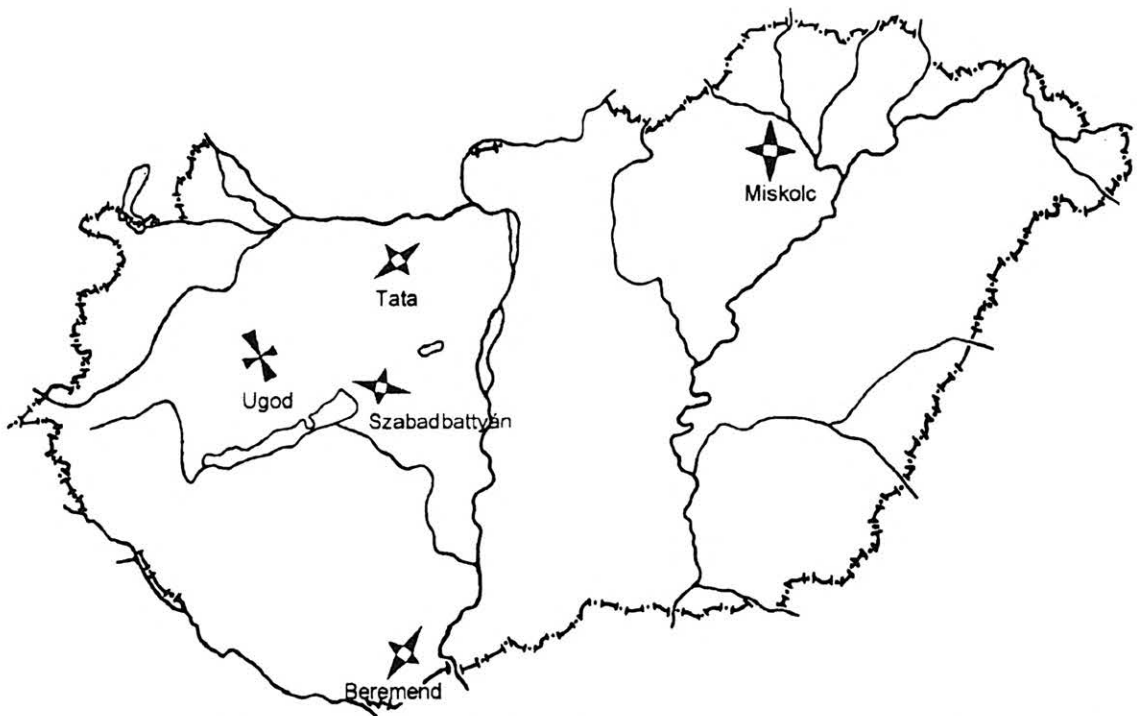
A tíz mérés közül hétben tenziós, kettőben hidrosztatikus (6. és 9. mérés) és egyben (1. mérés) kompressziós feszültségállapotot mértünk, amelyből úgy tűnik, hogy e kis mélységtartományban az extenziós feszültségállapot dominál. Az eredmények eloszlásából jól látszik, hogy erősen szóródnak és a tatai méréssel ellentétben nem csoportosulnak egyetlen irány köré sem. Értelmezésüknél ezért fokozottan figyelembe vettük a mérési jegyzőkönyvben foglalt észrevételeinket. Ezek alapján csak a 3., 5. és 8. mérések adatait találtuk megbízhatónak. E mérések átlagára  $101-281^\circ \pm 35$  adódott (7E. ábra). Figyelembe véve a megfelelő adatok kis számát és a szórás nagyságát a... mondhatjuk, hogy ez a főfeszültségi irány önmagában csak fenntartásokkal fogadható el.

## Összefoglalás

1989 óta néhány sikertelen próbálkozás mellett öt eredményes ráfúrásos közetfeszültség-mérést végeztünk az ország különböző szerkezeti egységeiben. Tapasztalataink alapján igen nehéz minden szempontból megfelelő feltárást találni, azonban ha ez sikerül, akkor a módszer az összes feszültségmérési eljárást tekintve egyedülálló adatokat szolgáltat a kéreg recens feszültségállapotáról.

Beremenden, Miskolcon, Tatán és Szabadbattyánban tenziós, Ugodon pedig kompressziós feszültségtérrel mértünk. Utóbbi két esetben a legnagyobb horizontális feszültség iránya ÉNy-DK-i, a többiben É-D és ÉK-DNy közötti volt (8. ábra, 5. táblázat).

A kapott eredmények összhangban vannak más mérési adatokból kapott hazai és külföldi adatokkal [GERNER 1992], tektonikai és geodinamikai értelmezésükhöz azonban további mérések elvégzése szükséges hazánk egész területén és a környező országokban.



8. ábra. A legnagyobb és a legkisebb horizontális főfeszültség iránya és jellege a mérési pontokban. A maximális horizontális főfeszültség irányát nagy, a minimális irányát pedig kis háromszögek jelzik. A csúcsával kifelé mutató háromszög extenziót, a befelé mutató kompressziót jelez

Fig. 8. Styles and directions of the maximum and minimum horizontal principal stresses at the test sites. The big triangles show the direction of the maximum horizontal principal stress, the small triangles show the direction of the minimum horizontal principal stress. The triangles pointing outward indicate extension, the ones pointing inward indicate compression

Helyszín	Főfeszültség iránya	Szórás	Minősítés
Ugod	151-331°	18°	D
Beremend	31-211°	15°	D
Miskolc	1-181°	33°	D
Tata	53-233°	16,5°	D
Szabadbattyán	101-281°	35°	D

5. táblázat. A mérési eredmények összefoglaló táblázata

Table 5. Summary of the measurements discussed in the paper

### Köszönetnyilvánítás

A cikk írói köszönettel tartoznak HORVÁTH Ferencnek és DÖVÉNYI Péternek támogatásukért és a munkafeltételek biztosításáért. Köszönet illeti a karlsruhei egyetem munkatársait is, akik felszerelésüket rendelkezésünkre bocsátották és megtanították a mérés és kiértékelés módjaira. E munka a „Magyarország mai feszültségállapotának meghatározása” című OTKA I/3.2131 számú kutatási támogatás keretében készült.

### HIVATKOZÁSOK

- ANDERSON E. M. 1951: The dynamics of faulting. Second Edition, Oliver and Boyd, Edinburgh
- BECKER A. 1989: In-situ stress measurements in Hungary. Kézirat, ELTE Geofizikai Tanszék, Budapest
- BONNECHERE F., FAIRHURST C. 1968: Determination of the regional stress field from „doorstopper” measurements. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., **68**, 520-544
- CROUCH S. L. 1969: A note on the stress concentrations at the bottom of a flat-ended borehole. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., **70**, 100-102
- DÖVÉNYI P., HORVÁTH F. 1990: Determination of contemporary crustal stress regime in Hungary. Acta Geod. Geoph. Mont. Hung., **25/3-4**, 257-266
- DÖVÉNYI P., HORVÁTH F., FODOR L. 1988: Kőzetfeszültségi viszonyok meghatározási lehetőségeinek vizsgálata mélyfúrásokban lyukbőség adatok alapján. Kézirat, ELTE Geofizikai Tanszék, Budapest
- FÜLÖP J. 1975: Tatai mezozoós alaphegységgrögök. Geologica Hungarica Ser. Geol. Tomus 16
- GERNER P. 1992: Recens kőzetfeszültség a Dunántúlon. Földtani Közöny, **122/1**, 89-105
- GOUGH D., GOUGH W. 1987: Stress near the surface of the Earth. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., **15**, 545-566

- JAEGER J. C., COOK N. G. W. 1976: Fundamentals of rock mechanics. Second Edition, Chapman and Hall Ltd, London
- LEEMAN E. R. 1964: The measurement of stress in rock. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, **65**, 45-114
- LEEMAN E. R. 1971: The CSIR „doorstopper” and triaxial rock stress measuring instruments. *Rock Mechanics*, **3**, 25-50
- MEANS W. D. 1976: Stress and strain. Springer Verlag, New York, Heidelberg, 1-339
- MÜLLER B., ZOBACK M. L., FUCHS K., MASTIN L., GREGERSEN S., PAVONI N., STEPHANSSON O., LJUNGGREN C. 1992: Regional patterns of tectonic stress in Europe. *J. Geoph. Res.*, **97**, 11783-11803
- SCHEIDEGGER A. E. (Ed.) 1980: Tectonic stress in the Alpine-Mediterranean region. *Rock Mechanics Supplementum* **9**, 255 pp
- VAN HEERDEN W. L. 1968: The effect of end of borehole configuration and stress level on stress measurements using „doorstoppers”. *Rep. Coun. Scient. Ind. Res. S. Afr.*, Meg 626
- ZOBACK M. L. 1992: First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the World Stress Map Project. *J. Geoph. Res.*, **97**, 11703-11728
- ZOBACK M. L., ZOBACK M. D. 1980: State of stress in conterminous United States. *J. Geoph. Res.*, **85**, 6113-6156
- ZOBACK M. L., ZOBACK M. D., ADAMS J., ASSUMPCAO M., BELL S., BERGMAN E. A., BLÜMLING P., BRERETON N. R., DENHAM D., DING J., FUCHS K., GAY N., GREGERSEN S., GUPTA H. K., GVIHIANI A., JACOB H., KLEIN R., KNOLN P., MAGEE M., MERCIER H. L., MÜLLER B., PAQUIN C., RAJENDRAN K., STEPHANSSON O., SUARES G., SUTER M., UDIAS A., XU Z. H., ZHIZHIN M. 1989: Global patterns of tectonic stress. *Nature*, **341**, 291-298