

# A ROBBANTÁSOK SZEIZMIKÁJÁNAK PROBLÉMÁI<sup>1</sup>

*Dr. Kis Miklós*

*fizikus*

## 1. A szilárd anyagok robbantása

A szilárd anyagban elhelyezett és felrobbantott gömb alakú töltet hatására a homogén anyagban húzó és nyomó feszültség lép fel, melyek következtében, ha a feszültségek a húzó szilárdságot túllépik, az 1.ábra szerinti anyagtönkremenetel következik be [1.].



1. ábra. Az anyag tönkremenetele a robbantás hatására Thum szerint

A feszültségek kialakulásának és leépülésének ideje, valamint a feszültség pillanatnyi értéke függ a robbanóanyag mennyiségétől, a detonációs sebességtől, a kőzetben fellépő feszültségek terjedési sebességétől, a keletkező repedések terjedési és szétnyílási sebességétől, és még számos a kőzetre, illetve a robbanóanyagra jellemző paramétertől. A folyamatban nagy jelentősége van a robbanóanyag detonációjakor keletkező nagy nyomású gázok kialakulásának (potenciális energia), mellyel a kívánt és a nem kívánt munkát elvégeztetjük. A folyamat bonyolultságát növeli, hogy a már homogénnek látszó anyagban is a tönkremenetel kezdetét és szétterjedését a hibahelyek mellett várhatjuk (rácshibák, Griffith zónák), egyre jobban közelítve a reális anyagokat a

---

<sup>1</sup> A tanulmány 1996-1997 között készült. Az ezt követő kutatási eredményeket nem tartalmazza.

A Robbantástechnika folyóirat (HU ISSN 1788-5671) 26. számban (2006. december) megjelent tanulmány (pp. 28-48) másodközlése

hibahelyek szerepét egyre jobban a makrohibahelyek veszik át (meglevő feszültségzónák, mikrorepedések, elválások, beágyazódások), tehát a kőzet makro stuktúrája. Ugyanekkor egyre nagyobb szerepet kap az is, hogy a robbantásoknál a töltetek nyújtottak, és a robbantólyukon belül kialakuló feszültségkép ezáltal idő és térfüggővé válik. Mint minden energiahasznosítási folyamatban, így a robbantásnál is keletkeznek veszteségek, melyek általában nem kívánt jelenségeket hoznak létre. A robbantások esetén ezek a léglökés, a szeizmikus hullámok, a túlzott mértékű kivetés, a hőveszteségek, stb. Ezek lehetséges mértékének becsléséhez legalább nagyvonalakban ismerni kell a robbantásnál kialakuló folyamatok időbeni lefutását.

### **1.1. A robbantásoknál keletkező hatások időbeni keletkezése és lefutása**

A gyakorlati robbantásoknál a töltetek hossza néhány cm-től 50-60 m-ig is változhat, az alkalmazott robbanóanyagok detonációs sebessége 1 000 - 8 000 m/s közötti érték lehet, az 1 kg robbanóanyagból keletkező gáz térfogata az 1 000 l-t közelíti, hőmérséklete pedig 2 000 -2 500°K is lehet. A töltet átalakulási ideje tehát néhány  $\mu$ s-től néhány ms-ig terjedhet, a keletkező nyomásnövekedés mintegy öt-hat nagyságrendű.

Amennyiben a töltetnek csak néhány cm-es darabját tekintjük, belátható, hogy a nyomás kialakulási idejének alig van jelentősége, egyszerű ugrásfüggvénynek tekinthetjük. Ez a nagy nyomás mindaddig fennmarad (eltekintve az alig jelentős hőáramlástól és más disszipatív jelenségektől), míg a kőzetben az elmozdulások legalább részben be nem fejeződnek. Ezek az elmozdulások a repedések keletkezése és szétnyílása, plasztikus anyag esetén a kialakuló üreg körül elkezdődő folyás és a kaverna kialakulása, a fojtás kirepülése, stb. A repedések kialakulásának ideje a repedés terjedési sebességétől és az előtét nagyságától függ. A gyakorlatban az előtét értéke néhányszor 10 cm-től néhány m-ig terjed. A repedések terjedési sebessége ilyen

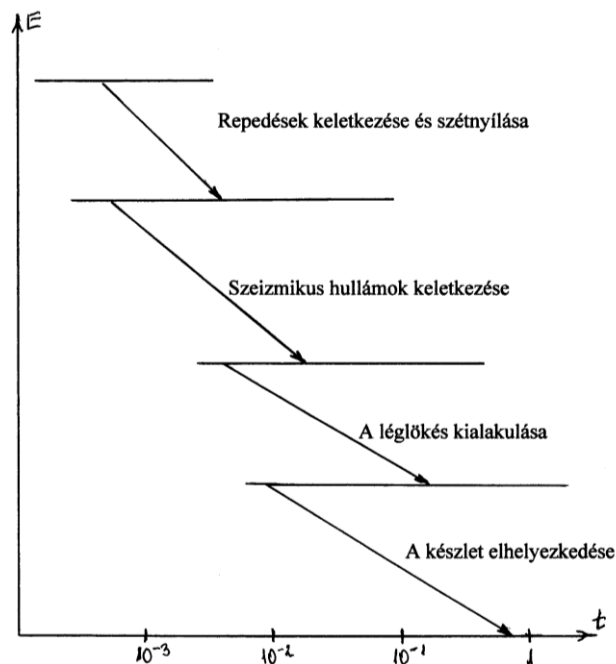
nyomások esetén az anyagban terjedő hang sebességének kb. fele, harmada [2.]. A repedések kialakulásának ideje így néhányszor tíz  $\mu\text{s}$ -tól néhány ms-ig terjedhet.

Továbbra is csak ezt a néhány cm-es szakaszt tekintve, a megbontott kőzetben a repedések kezdenek szétnyílni, a megbontott kőzet előre kezd mozdulni, következésként mód nyílik a robbantási gázok által keletkezett nyomás leépülésére, aminek következménye, hogy a kőzet meg nem bontott részében is leépül a detonáció miatt keletkezett feszültség, tehát befejeződik a szeizmikus hullámok keletkezésének lehetősége. A még meglevő nyomás a már megbontott darabok felületén hat, ennek a robbantólyuk tengelyétől nézve radiális komponense erőhatást fejt ki a kőzetdarabokra, ezáltal ezek gyorsulnak mindaddig, míg az elmozduló darabok közt a gázok ki nem tudnak törni. A gázok kitörésének kezdetekor kezd felépülni a léglökés hulláma, melynek csúcshulláma az időközbeni expanzió miatt lecsökkenő nyomásértéktől függ. Végezetül a megbontott kőzetdarabokra az erőhatás megszűnik, és a már szétbontott kőzetdarabok a gyorsulási szakaszon elért végsebességükkel a ferde hajításra vonatkozó összefüggések szerint kirepülnek, a repülésük közbeni ütközések befejezik a további darabolódást, és a készlethalmaz a földre érésel kialakul. A teljes folyamat vázlatát a 2. ábrán látható.

## **1.2. Az időzített robbantások megbontási folyamatai**

Belátható, hogy az elsőnek felrobbantott robbantólyukban levő töltet nem csupán a kivetett kőzetet bontja meg, hanem a visszamaradó anyagban is változást hoz létre, pl. feszültségcsoportokat, kisebb-nagyobb repedéseket. Ezek helyzete, állapota befolyásolhatja a soron következő töltet felrobbanását követő folyamatokat. Mivel ezen állapotok léte és terjedése időfüggő, ugyancsak belátható, hogy létezik egy kedvező időpont a következő töltet indításához, amikor is a visszamaradt állapotok a megbontási folyamatot kedvezően

befolyásolják, azaz létezik az optimális késleltetési idő [3.]. Erre utal, hogy az időzítési intervallum változtatásával más szemszerkezetet kapunk, továbbá az is, hogy az elektronikus időzítésű gyutacsokkal, tehát pontosabb időzítési intervallummal bíró gyutacsokkal, a robbantás még eredményesebb [5.].



2. ábra. A kőzetben elvégzett robbantás után kialakuló hatások

### 1.3. A robbantólyukak hossza mentén előálló állapotok időbeni változása

Az 1.1. pontban elmondottak alapján nyilvánvaló, hogy a kőbányászásban szokásos 20-30 m-es falmagasságok esetén az iniciálás helyétől függően egy töltet felrobbanási ideje 2-10 ms körüli idő alatt történik meg. Ezzel az időtartammal összemérhető a repedések kialakulásához szükséges idő. Úgy tűnik, hogy a töltet indításának helyével mód van nemcsak a készlet elmozdulását, illetve kialakulását befolyásolni, hanem arra is, hogy a megbontást számunkra kedvező helyen kezdjük el, ezáltal befolyásolhatjuk a készlet szemszerkezetét azzal, hogy mely töltetszakaszon kíséreljük meg legtovább benttartani a nagynyomású gázokat [6.].

#### 1.4. A robbantási energia és az elvégzett munka matematikai összefoglalása

Az eddig elmondottak alapján a robbanóanyag kémiai energiáját mechanikai energiává átalakítva, azzal térben és időben többé-kevésbé szétváló különböző munkát végeztetünk. A különböző energia részeket matematikai formában összefoglalhatjuk a következők szerint:

$$E = E(r) + E(k) + E(sz) + E(l) + E(v) \quad (1)$$

ahol  $E$  a robbanóanyag teljes energiája, melyből  
 $E(r)$  a közet megbontására,  
 $E(k)$  a közet kivetésére,  
 $E(sz)$  a szeizmikus hullámkeltésre,  
 $E(l)$  a léglökésre fordított energia, és  
 $E(v)$  az összes többi veszteségként jelentkező rész.

Az (1) egyenletet végigosztva  $E$ -vel a

$$1 = \eta(r) + \eta(k) + \eta(sz) + \eta(l) + \eta(v) \quad (2)$$

egyenletet kapjuk, ahol a  $\eta$  számok hatásfok jellegűek [7.]. Mivel az  $E(i)$  mennyiségeket a teljes  $E$  energián kívül elsősorban az illető folyamat ideje határozza meg, és ez összefügg az előtte és az utána lejátszódó folyamattal, létezik optimális ideje, következésként  $E(i)$ -knek is létezik optimális értéke. Az ettől való eltérés növeli, vagy csökkenti az összes többi értéket. Így pl. gyorsan befejeződő megbontásnál nagy gáznyomás marad vissza, mely megnöveli a kivetésre fordított energiarészt, a megbontott közet gyorsabban mozdul el, mint optimális esetben, következésként gyorsabban törnek ki a robbantási gázok, veszélyes mértékű közetszórás keletkezik, túl nagy lesz a léglökés, ugyanakkor a szeizmikus hullámkeltésre fordított energia csökken, kisebbek lesznek a rezgések.

Amennyiben ezeket az energiahányadokat egységnyi energiára (egységnyi robbanóanyagra) vonatkoztatjuk, azt kapjuk, hogy a (2) összefüggésben szereplő  $\eta(i)$  mennyiségeknek külön- külön létezik optimális értéke. Ezek közül, ha

kettőt, vagy többet számszerűen jellemezni tudunk, (mérjük valamilyen jellemzőjét), a robbantás optimálistól való eltérésére következtethetünk. A szeizmikus mérések tehát a technológia megfelelő voltára is enged következtetni, ugyanakkor nyilvánvaló, hogy minden határon túli csökkentésének nemcsak elvi, hanem robbantástechnikai korlátai is vannak.

## 2. A robbantással keltett szeizmikus hullámok

A robbanóanyag detonációja hatására hirtelen nyomásugrás keletkezik. Az ezáltal keletkező mozgások a hullám egyenlettel írhatók le:

$$\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \Delta X \quad \text{ahol} \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad \text{és} \quad (3)$$

$$X = \text{grad } S + \text{rota} \quad (4)$$

a skalár és a vektor potenciálok. További matematikai műveleteket végezve azt kapjuk, hogy szilárd anyagban a  $c(\text{komp})$  terjedési sebességű kompressziós hullámok mellett a  $c(\text{rot})$  terjedési sebességű hullámok is léteznek, melyek terjedési sebessége a nyírási és a kompressziós modulustól függ. A (3) egyenlet megoldásainak keresésekor a peremfeltételeket végtelen térfélre is választhatjuk. Ekkor a  $c(F)$  terjedési sebességű felületi hullámokat is kapjuk. Kimutatható, hogy ezek a kompressziós és a rotációs hullámok szuperpozíciójával keletkeznek, és  $c(F) < c(\text{rot}) < c(\text{komp})$ .

A hullámegyenlet egyik megoldásának alakja:

$$F(\mathbf{r}, t) = f(\mathbf{r} - \mathbf{c}t) + f(\mathbf{r} + \mathbf{c}t) \quad (5)$$

ahol  $F$  és  $f$  az egyenlőre ismeretlen függvényt jelenti,  $r$  a hullám kiindulási távolsága a megfigyelési ponttól,  $c$  a terjedési sebesség és  $t$  a futó idő. Ez az ismert Huyghens-elv: a hullám által átjárt tér egy pontja további hullám kiindulási pontja, és ezen hullámok szuperpozícióját tudjuk érzékelni.

Mindegyik hullám hatására térbeli mozgás keletkezik, tehát Descartes féle koordinációs rendszerben x, y, z irányú komponensekre bonthatók, és ezek periódikus mozgások. Így pl. az x irányú kitérésre:

$$x = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cdot \sin(\omega_i t) + B_i \cdot \cos(\omega_i t) \quad (6)$$

A hullámképből az  $A_0$ ,  $A_i$ ,  $B_i$  együtthatók matematikai módszerekkel meghatározhatók, melyek a hullám spektrumát adják. A keletkezett hullám körfrekvenciája:  $\omega_i$ .

A rezgési kitérés mellett meghatározható a rezgési sebesség és a rezgési gyorsulás is, amelyekre az x irányú komponensek:

$$v(x) = \frac{dx}{dt} \quad a(x) = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (7/a)$$

Ha ezeket harmonikus hullámoknak tekinthetjük, akkor a (6) egyenlőséget is figyelembe véve:

$$v(x) = \frac{x}{\omega} \quad a(x) = \frac{v(x)}{\omega} \quad (7/b)$$

tehát ezek is szinuszos hullámok.

A szeizmikus rezgések tovaterjedésekor a  $v(t)$  rezgési sebességet geofonnal regisztrálhatjuk, melynek ismeretében egy R távolságban a rezgési energiát meghatározhatjuk, melyre:

$$E_{sz} = 4\pi R^2 \rho c \int_0^\infty v^2(t) dt \quad (8)$$

A  $v$  rezgési sebesség és a  $Q$  töltetnagyság közötti összefüggést a [8] irodalomból vesszük át, mely szerint:

$$\frac{E_{sz}}{\sqrt{Q}} = A \cdot \exp - \frac{\beta \cdot E_{sz}}{\sqrt[3]{Q}} \quad (9)$$

Nem szokás törekedni a teljes szeizmogram matematikai formulával, integrálható formában történő felvételére, hanem csak a legnagyobb rezgési sebesség értékének számítására. A (8) és a (9) összefüggések összevetése és sorfejtés után a  $v = v(Q,R)$  függvény megadható, melyből a  $v$  rezgési sebesség csúcserkére a következő összefüggés adódik:

$$v = K^* \frac{(\sqrt{Q})^n}{R^n} \quad (10)$$

Amennyiben a (10) összefüggésben az  $n=1$  értéket választjuk,  $R$  helyett pedig az  $l$  távolságot helyettesítjük, a jól ismert Koch - képlethez jutunk:

$$v = k^* \frac{\sqrt{Q}}{l} \quad (11)$$

## 2.1. Az időzített robbantások szeizmikus hullámai

Az időzített gyutacsok megjelenésével, és az ezekkel végzett időzített robbantások terjedésével általános tapasztalat volt, hogy a keltett hullámok amplitudói lényegesen csökkennek. Okát az időzített robbantásoknál bekövetkező interferenciákban, vagy ezt közelítő jelenségekben látták [9]. Ma már ismert, hogy interferenciáról nem lehet beszélni, mivel a szeizmikus hullámok nem harmonikus hullámok [1. Megjegyzés]. Oka elsősorban a hullámkeltésnél fellépő közetmegbontáskor keletkező disszipatív jelenségekben keresendő. Alig képzelhető el olyan közet, amelynél a robbantásra kerülő közetben a hibahelyek eloszlása, geometriai eloszlást tekintve, a robbantólyukak közötti távolsággal összemérhető mintaértékeket tekintve, az eloszlás egyenletes legyen.

A keltett hullámban rezgési energia fut tova, és elérve egy adott pontot, munkát végez. Ennek a pontnak egy tetszőleges méretű környezetét izoláltnak tekintve, nyilvánvaló, hogy a kívülről ható energia mennyiségénél kisebb



munkát lehet csak onnan kivenni, tehát a tovaterjedő hullám energiája folyamatosan csökken, a rezgések csillapított rezgések. Ennek következménye a folytonosan csökkenő frekvencia. Általában a robbantásokhoz közel felvett szeizmogramokon szétválaszthatók a nagyfrekvenciájú térbeli (S és P hullámok) és a kisfrekvenciájú felületi hullámok. Viszonylag kis távolságokon túl a térbeli hullámok eltűnnek. A talaj, amelyben a hullám terjed, nem azonos mértékben csillapítja a különböző frekvenciájú hullámokat, tehát a csillapítási együttható (így az abszorpció együttható is) szelektív [10]. Ennek egyenes következménye, hogy a terjedési sebesség is frekvenciafüggő. Összefoglalva: a szeizmikus hullám diszperziós hullám, és a szeizmikus hullámban a nagyobb frekvenciájú rész jelenik meg először, és fokozatosan jelentkeznek általában az egyre kisebb frekvenciájú részek [2. és 3. Megjegyzés].

A robbantási helytől távolodva tehát a (10) összefüggésnek megfelelően folyamatosan csökkenő rezgési sebesség csúcsértéket várhatunk, amíg a hullámterjedés azonos, vagy közel azonos talajon (kőzeten) történik. Mint ahogy a szeizmikus rétegműködésből ismert, az eltérő terjedési sebességű rétegek a reflexió (vagy, ha a refrakció létrejöhet, a refrakció) együtthatónak megfelelően a hullám egy részét visszaverik, és csak a fennmaradó rész jut át a reflektáló rétegbe. Felületi hullám esetén a jelenség kissé más. Általános, hogy a külfertés kőzetéből a hullám kisebb terjedési sebességű rétegbe jut, és a befutó energia kisebb sebességgel tud tovább áramolni, következményeként a rezgési sebesség az átmeneti szakasz közelében nő, vagy csak kisebb mértékben csökken, annak ellenére, hogy a szeizmikus energia csökken [11]. Az effektust először a földrengéskutatásban mutatták ki [12], [4., 5. és 6. Megjegyzés].

## **2.2. A robbantásnál keletkező hullámok csúcsértékét befolyásoló tényezők**

A (2) egyenlet értelmezésénél kimutattuk, hogy a robbantásoknál létezik egy optimális mértékű szeizmikus hullámkeltés az optimális méretű kivetés,

darabozottság, stb. mellett. Értelemszerűen erre az optimumra kell törekedni, melyhez tartozik természetesen egy optimális késleltetési idő is [3,4]. Valószínű, hogy az elektronikus gyutacsok a nagy időzítési pontosságuk miatt beállítható optimális késleltetési idő miatt a közeljövőben nagy jelentőséget kaphatnak [5]. Többsoros robbantási technológia esetén a rendelkezésre álló gyutacsfokozatok az egy fokozatban felrobbantott töltetnagyságot is megszabják. Úgy tűnik ezektől a technológiáktól alig lehet eltérni [13]. A rezgések csökkentésének legeredményesebb módja természetesen a Q töltet csökkentése. Ennek határát valószínű a falmagasság csökkentésénél, vagy az osztott töltetek alkalmazása esetén jelentkező többletfűrésok gazdaságossági határai szabják meg [14], tehát ilyen vonatkozásban is kompromisszumra kell a jövőben törekedni.

További lehetőséget adhat a falbeméréssel meghatározott optimális előtéttel való tervezés [15], esetleg nem egyvonalban kitűzött lyukakon keresztül [16]. Ma még nem általánosan elfogadott a lyuktalpról történő indítás előnye, bár ezt több éve bizonygatják [17, 18]. Tény, hogy ellene is felhozhatók érvek [19].

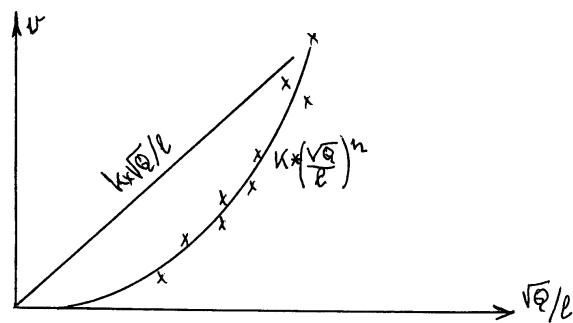
A robbantással keltett és már egy távolságban kialakult rezgések csökkentésére, illetve ezek befolyásolására alig van mód, vagy ezek az eljárások rendkívül költségesek [20,21], ezért a rezgések csökkentéséről a robbantás helyén kell gondoskodni.

### **2.3. A szeizmikus rezgések számítási lehetőségei**

A szeizmikus rezgéseket napjainkban biztonsági szempontból kívánják még a robbantás előtt meghatározni. A robbantás helyétől R távolságban levő védendő létesítményt építési módja, kora, funkciója, állaga, stb. alapján kategóriába sorolják, és ezen kategóriák alapján határozzák meg a még megengedhető legnagyobb rezgési sebességet. Ezek a kategóriák az I. táblázatban találhatóak. A kategóriákhoz a még megengedhető legnagyobb

rezgési sebességet 0-30Hz, és 100Hz-nél nagyobb intervallumra adjuk meg. Ezek az értékek általában irányadók a robbantást végzők felé. A  $v$  értékének számításához használt képletek országonként eltérhetnek, a (10) összefüggéssel azonban elég jó közelítéssel egyeznek. Magyarországon a Koch-képletet kell használni a robbantási engedély kérelemnél, melynél a  $k$  biztonsági tényező értékét előírják [22].

Amennyiben mód nyílik néhány robbantás alapján a  $v=v(Q,R)$  összefüggést meghatározni, (ahol  $v$  most valamelyik komponens, többnyire a kötelezően előírt  $v_x$  robbantás irányába mutató komponens), a 3. ábra szerinti összefüggéshez jutunk, melyből a (10) összefüggés állandói meghatározhatók. Ezen az ábrán adjuk meg a Koch-képlet szerinti egyenest is.



3. ábra. A  $Q^{1/2}/l$  függvényében felvett „mért” adatok és a Koch egyenes

Nyilvánvaló, hogy a Koch-képlet biztonsági képlet, mivel azt a számított értéket adja egy megfelelően választott  $Q^{1/2}/R$  intervallumban, amelynél kisebb lesz a robbantással valóban keltett rezgési sebesség csúcserőke. A biztonság a magyarországi tapasztalatok szerint esetenként 5-6-szoros, vagy még nagyobb arányú, tehát erősen túlzott. Tapasztalataink szerint kőbányászati robbantások esetén kb. 95% annak a valószínűsége, hogy a keltett hullámok rezgési sebessége a számított rezgési sebesség alatt marad az előírt  $k$  értéket használva a számításoknál. Ismert volt olyan bányá, ahol ez nem feltétlen teljesül [11]. A (10) képlettel meghatározott várható érték 10-15%-os pontossággal fogadható el, és csak arra a bányára érvényes az összefüggés, amelyre  $K$ ,  $n$  paramétereket meghatároztuk. Más bányánál az összefüggés bizonytalansága ezeket a

paramétereket használva lényegesen nagyobb, eltérő technológia esetén az összefüggés gyakorlatilag használhatatlan, tehát  $K$  és  $n$  paramétert újra meg kell határozni.

### I. Táblázat

A még megengedhető legnagyobb rezgési sebesség értékek ( $v_m$ ) [22.] szerint a 0–30 Hz intervallumban, és ezek átszámítása 100 Hz-es rezgésekre ugyancsak [22.] szerint, kivonatosan.

Osztály	Az épület leírása	$v_m$ [mm/s]	
		0 – 30 Hz	100 Hz
I	Statikailag bizonytalan, megrongálódott építmény, műemlék, nyomás alatt lévő csővezeték	2	4
II	Panelház és statikailag nem teljes értékű építmény	5	10
III	Statikailag kifogástalan építmény, torony, gyárkémény	10	20

Olyan összefüggés, mely a rezgések frekvenciájára vonatkozik nem ismert.

### II. Táblázat

A  $k$  biztonsági tényező értékei [22.] szerint

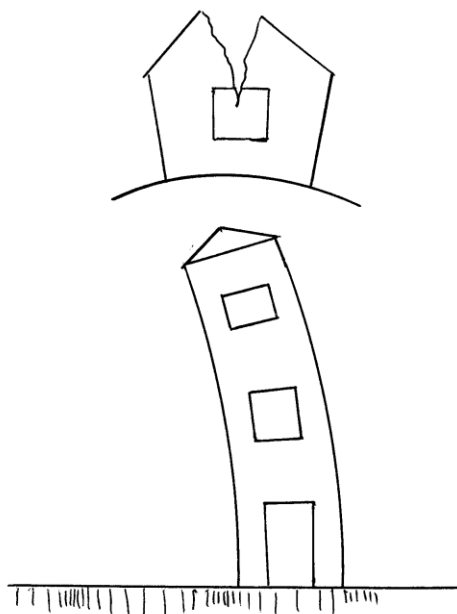
A robbantás környezete, vagy körülményei	$k$
Víz alatt, vagy mocsaras talajban tervezett robbantás	100
Egy éven belül ötnél többször ismétlődő robbantásnál	50
Egyedi robbantás esetén	25
Rátett töltet, vagy áthalmazott anyag terítése esetén	5

Az eddigi tapasztalatok alapján megkockáztatható a következő kijelentés: ismeretlen (eddig nem végeztek szeizmikus mérést) robbantási területen a technológia nagyvonalú ismerete esetén (időzítés, legnagyobb töltetek) csak

becsülni lehet a várható rezgések nagyságát és frekvenciáját. Az első mérés után a becslés finomítható, és amennyiben a technológia ellenőrzésére kívánunk adatokat gyűjteni, esetleg összehasonlítani a változtatások hatását, ki kell szűrni a mérési hely megválasztásával az esetleges geológiai zavaró tényezőket [11,12]. Nem ismert, hogy kőbányai robbantásra sikerült volna már előre szintetikus szeizmogramot előállítani. Modell robbantás után felvett szeizmogram analízisével viszont már állítottak elő több lyukkal végzett robbantásra szeizmogramot, mely elég jó egyezést adott a kísérleti robbantásnál felvett szeizmogrammal [23]. Pirotechnikai időzítésű gyutacsoknál ez az egyezés alig várható, mivel az 1. pontban elmondottak a hibát növelik. Úgy tűnik, hogy az elektronikus gyutacsok a bizonytalanságok egy részét eliminálják, és módot adhatnak olyan kutatási feladatok elvégzésére, melyre eddig alig volt remény.

### **3. A szeizmikus hullámok károsító hatása**

Az (5) és a (8) összefüggés alapján nyilvánvaló, hogy a szeizmikus hullámban energia áramlik a robbantás helyétől a tér minden irányában. Ha a hullám építmény alá kerül, a hullámmozgást az építmény részben felveszi, részben tehetelensége miatt az alatta levő mozgásra késve reagál. A két lehetőség rendkívül leegyszerűsített rajzát a 4. ábra szemlélteti.



**4. ábra. A szeizmikus hullám hatása építményekre**

A talajmozgástól az építményre jutó hatás tehát függ attól, hogy a talaj és az építmény közti kapcsolat milyen mozgást enged az építményre átvinni, az úgynevezett átviteli függvénytől, másrészt attól, hogy erre a hatásra az építmény hogyan reagál, az épület válaszfüggvényétől. A függvények matematikai vizsgálatától kénytelenek vagyunk eltekinteni. Minden magyarázat nélkül belátható, hogy mindkettő függ a rezgések amplitudójától és frekvenciájától.

### **3.1. A hatások frekvencia függése**

Ha egy testet valamilyen mechanikai hatásnak teszünk ki (pl. összenyomjuk), és ezt a hatást hirtelen megszüntetjük, a hatást a test úgynevezett önrezgéssel reagálja le. Amennyiben a hatás megszűnt túl gyors, a rezgés kép bonyolult lehet. Ezek között azonban általában megtalálható a legkisebb frekvenciájú rezgés, mellyel létrehozva és megszüntetve a hatást, a test egyre nagyobb kitéréseket fog végezni, rezonancia lép fel. Ez a rezonáns frekvencia általában egyezik a test saját frekvenciájával, vagy annak többszörösével. Természetesen egy építmény szerkezeti elemeire és magára az

építményre is ez igaz, ennek megfelelően létezik egy frekvencia, amelynél az átviteli függvény úgy viselkedik, hogy ott a lehetséges legnagyobb az energiaközlés, illetve az építmény ezekre a rezgésekre válaszol a lehetséges legnagyobb rezgésekkel. Az építmény sajátfrekvenciáját építészeti képletekkel meg lehet határozni. Alig van azonban tudomásunk rezgéskeltéssel, kísérletileg meghatározott sajátfrekvenciákról. A kevés számú kísérlet alátámasztja, hogy a veszélyes frekvenciasáv 1-30 Hz [24, 25], [7. Megjegyzés].

### **3.2. A hatások amplitudó függése**

Az építményen, a szerkezeti elemeken és a szerkezeti elemek kötésénél kialakult rezgések képesek a rezgésképtől függően húzófeszültséget létrehozni. Ha az így kialakult feszültség a szerkezeti elem, vagy annak kötésének húzószilárdságát meghaladja, természetesen repedés jön létre. Nyilvánvaló, hogy a húzófeszültség a rezgések amplitudójától, a (7) összefüggés szerint a rezgési sebességtől és a frekvenciától függ, továbbá az is, hogy a károsodás először mindig a legkisebb húzószilárdságú helyen keletkezik. Ennek megfelelően a rezgési sebesség növekedésével a károk keletkezési sorrendje általában a következő: vakolati repedések tovaterjedése, új vakolati repedés keletkezése, sarkok mentén téglabetonelem elválás, stb.

### **3.3. A rezgések időtartamától, illetve gyakoriságától való függés**

Az építményeket életük során számos külső és belső hatásnak tesszük ki. Ilyen hatás a hőterhelés, szélnyomás, a szerkezeti elemeken bekövetkező fizikai-kémiai változások, stb. [25]. Az öregedés folyamán ezek a változások részben korrigálhatók (pl. újra vakolás, festés, stb.). A szeizmikus hatások ezeket a változásokat elősegítik. Úgy látszik, hogy gyakori hatás esetén az öregedés előbb következik be, és egyre nagyobb lesz a rezgések miatt bekövetkező, már érzékelhető kár fellépésének lehetősége, az építményt esetleg más kategóriába

kell átsorolni [8. Megjegyzés]. Mindezek ellenére úgy tűnik, hogy a rezgések gyakoriságának kisebb a jelentősége a károk keletkezésénél, mint azt számosan vélik.

#### **4. A szeizmikus károk valószínűségi értelmezése**

Az elmondottak alapján teljesen nyilvánvaló, hogy bármilyen kis rezgés is károsító, éppen ezért kategórikusan kijelenteni, hogy a még megengedett legnagyobb rezgési sebesség alatt kár nincs, fölötte pedig van, nem lehet. Amennyiben a károsodott építmény oldaláról közelítjük a kérdést, azt kell eldönteni, hogy az építményen volt-e olyan szerkezeti elem, amely valamilyen oknál fogva nem viselte el a rezgéseket, és miért viselte el egy másik építményen, vagy ugyanezen építményen egy másik elem. Már ebből a két szempontból is nyilvánvaló, hogy a bekövetkező és a be nem következő károkra statisztikát lehetne készíteni, és ezek értelmezéséhez a valószínűségszámítást segítségül lehet hívni.

##### **4.1. Az épülethibák eloszlása szerinti kárlehetőség értelmezése**

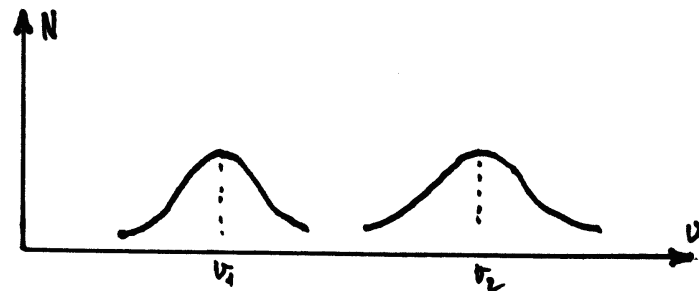
Tekintsünk egy nagyobb települést többszáz azonos jellegű és nagyságú építménnyel. Ettől a településtől elegendően messze hozzunk létre rezgéseket úgy, hogy minden épületre azonos nagyságú rezgés jusson.

A rezgéskeltés közben figyeljük meg az épületeket, és jegyezzük fel, hogy egyes rezgéseknél milyen kár jön létre. Ha ezek közül önkényesen kiválasztunk valamilyen kárt (pl. ablak feletti áthidaló és fal mentén keletkező repedés), belátható, hogy nem minden épületen keletkezik egyszerre a kár, hanem csak egy rezgési sebesség érték fölött egy-két épületen. Növelve a rezgési sebességet egyre több házon keletkeznek károk.

Plauzibilis az a feltevés, hogy a hibahelyek eloszlása a házakon a Gauss-eloszlást követi, és ennek megfelelően a kiválasztott kártípus is ezt követi.



Gondolatkísérletünk két kiválasztott káreseményének bekövetkezését a rezgési sebesség függvényében ábrázolva nyilván az 5. ábra szerinti képet kapjuk, melynél egyelőre ismeretlennek kell elfogadnunk, hogy a vízszintes (x) skála a v rezgési sebességnek milyen függvénye.



5. ábra. A 4.1. fejezet szerinti gondolat kísérlet eredménye

Más kár bekövetkezése feltehetően ugyanígy jellemezhető, ezáltal 1, 2, 3, ..., i, ..., N típusú károkat, illetve eloszlásokat kapunk. Valamilyen jellegzetes kár bekövetkezése tehát valamilyen valószínűségű, mely a v rezgési sebesség egyelőre ismeretlen függvényétől függ. Ezek alapján ugyancsak plauzibilis az a feltevés, hogy értelmezhető az i. esetre a  $\xi_i$  valószínűségi változó amellyel a  $P_i$  valószínűség:

$$P_i(\xi_i \leq f(v_i)) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{f(v_i)} \exp\left(-\frac{(m_i - f(v_i))^2}{2\sigma_i^2}\right) df(v_i) \quad (12)$$

ahol  $\sigma_i$  és  $m_i$  a szórás és a várható érték,  $P_i$  az i-edik esemény bekövetkezésének valószínűsége.

Amennyiben a  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_i, \dots, P_N$  események bekövetkeznek, ezekhez hozzárendelhetjük a  $k_1, k_2, k_3, \dots, k_i, \dots, k_N$  költségeket (pl. a helyreállítási költségeket), amelyekre feltehetjük, hogy

$$k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_i + \dots + k_N = K = 1 \quad (13)$$

Ezáltal normálást hoztunk létre, azaz az összes építmény értékét 1-nek

tekinthetjük a következő matematikai eljárásoknál.

A Gauss-eloszlásokra vonatkozó összefüggések szerint a  $\xi_i$  valószínűségi változók összegére értelmezhető a  $\xi$  valószínűségi változó, melyre:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \dots + \xi_i + \dots + \xi_N \quad (14)$$

és erre ismét érvényes a következő:

$$P(\xi \leq f(v)) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{f(v)} \exp\left(-\frac{(m - f(v))^2}{2\sigma^2}\right) df(v) \quad (15)$$

Az új összefüggéssel az összes kár bekövetkezésének valószínűségét kapjuk, mely mindaddig nem használható számításokra, míg az  $f(v)$  függvényt nem ismerjük.

#### 4.2. A békes célú nukleáris robbantások kárai

Ahhoz, hogy a 4.1. pontban leírt gondolat kísérletet legalább valamelyest közelíteni lehessen, el kellene végezni egy olyan robbantást, amelynek szeizmikus hatását nagy távolságban is érzékelni lehessen. Ilyen a nukleáris robbantás, amelynek hatását nagy távolságban is érzékelni lehet. Ezek közül egy esetben (erről van irodalmi adatokkal tudomásunk) mintegy 200 km-es körzetben végeztek szeizmikus méréseket, és egyúttal a bekövetkezett épületkárok számát is megadták [28]. Kénytelenek vagyunk feltételezni, hogy a 15-20 km-es sugárkülönbségű övezetekben az építmények jellege, hibahelyei összehasonlíthatók, ezért az adatok általános jellegűeknek tekinthetők. A károk számát a mért rezgési sebesség logaritmusának függvényében Gauss-féle skálán felvéve egyenest kapunk. Ez alapján az  $f(v)$  függvény alakja is eléggé alapos feltételezéssel élve logaritmikusnak vehető fel. Sajnos az irodalom nem közli a károk jellegét és a helyreállítási költségeket, melyeket más úton kell becsülni.

### 4.3. A károk mértéke néhány rezgési sebesség intervallumban

Mivel alig van konkrét mérési adat, illetve olyan konkrét szeizmikus kár leírás, melyhez mért rezgési sebesség is tartozik, kénytelenek vagyunk irodalmi becslésekre hivatkozni, melyeket a III. és a IV. táblázat tartalmaz [29, 30]. Ezeket az adatokat megerősítik a kisszámú magyarországi megfigyelések [9. Megjegyzés].

Ahhoz, hogy a III. és a IV. táblázat alapján a (15) összefüggéshez is használható adatokkal rendelkezünk, meg kell becsülni, hogy a táblázatokban leírt károkhoz milyen  $k_i$  értéket rendeljünk. Ezt egy módon lehet becsülni, ha megkíséreljük meghatározni, hogy az épület eredeti értékéhez viszonyítva a bekövetkezett kár helyreállítására fordított érték mekkora hányadot tesz ki. Ezeket a becsült arányokat a IV. táblázat 3. oszlopában vettük fel [31], [10. Megjegyzés].

Meg kívánjuk jegyezni, hogy az így felvett értékek vitathatók. Ezért minden további erre alapozott észrevétel, következtetés, számítás csak kritikai fenntartások mellett fogadhatók egyelőre el, míg ezek később nem pontosíthatók, illetve a számítások exakt volta kétségbe nem vonható. Célunk nem is a pontos összefüggés megkeresése, hanem az elv megfogalmazása, mely lehetőséget ad az exakt összefüggések megkeresésére.

### III. Táblázat

A szeizmikus károk mértékéhez tartozó rezgési sebesség értékek a hullám terjedési sebességének függvényében [29.] szerint. A  $v$  értékek mm/s egységben adottak

A kár leírása normál építménynél	A hullám terjedési sebessége [km/s]		
	1,0-1,5	2,0-3,0	4,5-6,0
Repedés nem észlelhető	18	30	70
Finom repedések, vakolati repedések	30	55	100
Repedések	40	80	150
Erős repedések	60	115	225

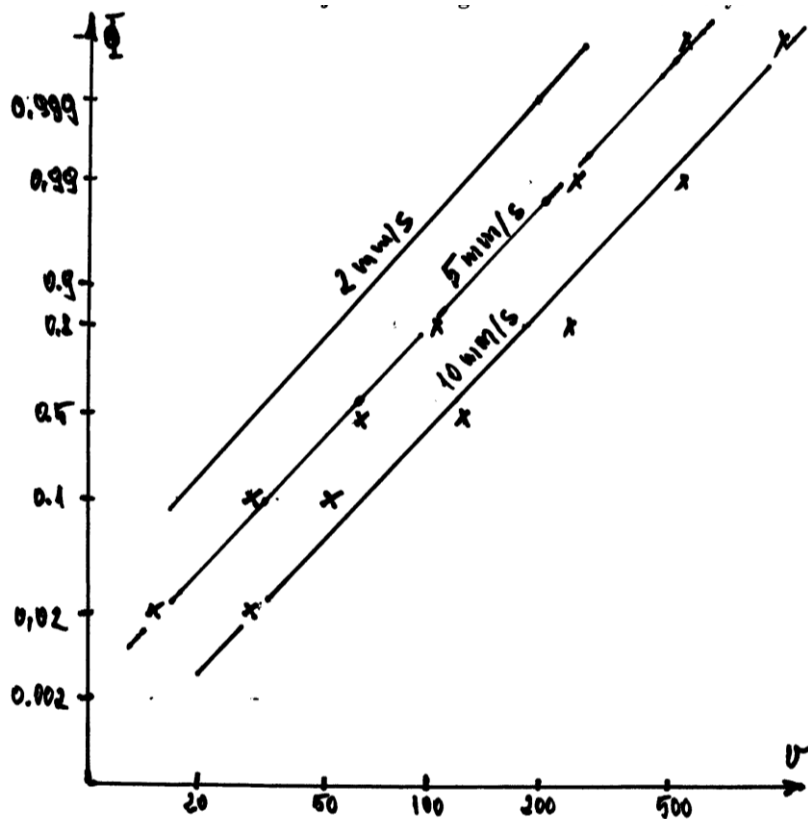
#### IV. Táblázat

Épületkárok különböző rezgési sebesség értékeknél [30.] szerint és a becsült helyreállítási költséghányadosok

Rezgési sebesség [mm/s]	Szeizmikus hatás	Költséghányad
8 - 15	Ablaküveg csörgése	'-'
15 - 30	Könnyű sérülések hibás helyeken	0,02
30 - 60	Könnyű sérülés bizonytalan szerkezeti részeken	0,1
60 – 120	Vakolati repedések, válaszfali repedések	0,4
120 – 240	Jelentős károk	0,8
240 – 480	Részleges omlás	0,99
480	Teljes omlás	0,9999

Összefoglalva a 4.1. és a 4.2. pontokban leírtakat, most már mód adódik a (15) összefüggés paramétereinek meghatározására, és ezzel együtt számítások elvégzésére is. Ehhez azonban még egy feltételt meg kell fogalmazni. Fogadjuk el, hogy a lehetséges kár megjelenése az épületosztályok II. csoportjában az alsó rezgési sebesség értékekhez, míg a III. osztálynál a felső rezgési sebesség értékekhez tartoznak. Ezekhez az értékekhez egy-egy egyenes húzható, ha azt olyan grafikonon ábrázoljuk, melynek függőleges (y) tengelye Gauss-féle, vízszintes (x) tengelye pedig logaritmikus osztású. A két görbével párhuzamosan a 6. ábrán tőlük balra a kettő közötti távolsággal egy további görbe húzható.

Fogadjuk el ezt az I. épületosztályra érvényesnek. A három görbéhez tartozó  $m$  és  $\sigma$  értékek most már meghatározhatók, ezek ismeretével a  $P(1)$ ,  $P(2)$  és  $P(3)$  valószínűségek is számíthatók valamely  $\log(v)$  értékhez. [32], [11. Megjegyzés].



6. ábra. A  $\Phi=\Phi(v)$  függvény

#### 4.4. A még megengedhető legnagyobb rezgési sebesség értékének valószínűségi értelmezése

Az előállított függvényekkel és az így meghatározott  $m$  és  $\sigma$  értékekkel bármely  $v$  rezgési sebesség értéhez a  $P$  valószínűség meghatározható, konkrétan a még megengedett legnagyobb rezgési sebesség értékekhez is. Ezeket az  $V$ . táblázatban adjuk meg  $m$  és  $\sigma$  értékeivel együtt. A táblázat eredménye nyilvánvaló: a még megengedhető legnagyobb rezgési sebesség értékeknél a kár valószínűsége annyira kicsi, hogy azt ki lehet zárni, illetve fizetőeszközben kifejezhető értéke gyakorlatilag nincs.

## V. Táblázat

A még megengedett legnagyobb rezgési sebesség értékek három épületosztályra, és az ezekhez tartozó  $m$ ,  $\sigma$  és  $P$  értékek

Osztály	$v_m$ [mm/s]	$m$	$\sigma$	$P$
I	2	1,681241		$2,7 \cdot 10^{-8}$
II	5	1,819544	0,251399	$4,2 \cdot 10^{-6}$
III	10	1,973128		$5,4 \cdot 10^{-5}$

A robbantás várható szeizmikus hatásának becslése esetén, ha a tervezéshez ezt a valószínűséget is meghatározzuk, meghatároztuk az ilyen irányú rizikóvállalás mértékét is. Amennyiben más rizikófaktort is becsülni lehet, például a közetszórás valószínűségét, vagy a léglökés nagyságát, és ezekhez is sikerül ezeket a rizikófaktorokat hozzárendelni, megvizsgálhatóvá válhat, hogy a robbantástechnológiai változtatás milyen biztonsági változásokat vonz, esetleg ezek optimuma is meghatározhatóvá lesz.

### 4.5. A robbantások gyakorisága és a károk közötti összefüggés

A rezgések gyakorisága és a károk közötti összefüggés kérdése talán a legvitatottabbak egyike a robbantástechnikai kérdések közül. A kérdésre elfogadott elmélet tudomásunk szerint nincs. Újszerű magyarázattal Dr. Somosvári Zsolt próbálkozott [41.]. Ezen elmélet megkísérelt a fémek ismert vibrációs hatásra való előregedésével és az építmények ugyanilyen tönkremenetelével kapcsolatot keresni. Sajnos az elmélet nem eléggé meggyőző több szempont miatt. Az építmények általában nem homogének a fémekkel ellentétben, sőt az egyes szerkezeti elemekről sem állítható ugyanez. Még az egyes szerkezeti elemek rugalmassági modulusai is jelentősen eltérnek a fémek hasonló jellemzőitől. Következésként a fémekkel ellentétben az építményeket nem lehet sem homogénnek, sem ilyen mértékben rugalmasnak tekinteni.

Mint arra már korábban céloztunk, a tönkremenetel akkor következik be, ha a húzófeszültség az egyes elemek kötési szilárdságát túllépi. Az első

tönkremeneteli hely nyilván a legkisebb szilárdságú kötésnél következik be. Mivel ekkor az itt felhalmozódott feszültség a tönkremenetellel felszabadul, egyben a kötés is megszűnik, az egymástól szétváló darabok a rezgéseket most már többé-kevésbé önállóan vehetik fel. Ez egyben azt is jelentheti, hogy a feszültségállapotok átrendeződése miatt az újabb rezgések itt már nem hatnak, a tönkremenetel következő fázisa egy újabb hibahelynél következik be, melynél nem feltétlen kisebb a húzószilárdság, mint az a már bekövetkezett kár helyén volt. Tehát az is lehetséges, hogy az újabb kár bekövetkezéséhez nagyobb rezgés szükséges, mint az előző kárt okozó rezgés volt.

Ezt alátámasztják a kőbányai melegedőknél tapasztalt károk is. Ezek az épületek úgy tűnik, nem fokozatosan mennek tönkre, hanem mindig a hozzá egyre közelebb kerülő robbantások okoznak újabb és újabb károkat, míg a távolabbi robbantások rezgései hatástalanok maradnak. Az épület mintegy önmaga védekezik a károk fokozódása ellen éppen a hibahely tönkremenetelével mindaddig, míg újabb hibahely tönkremeneteléhez elegendő rezgés nem éri. Az itt elmondottak alapján talán nem követünk el hibát, ha a kárbecslésnél a rezgések gyakoriságával nem számolunk, csupán az épületet ért legnagyobb rezgést vesszük figyelembe.

## **5. Perek szeizmikus károkkal kapcsolatban**

Mivel csak magyarországi tapasztalatokkal rendelkezünk, nem vállalhatjuk az általánosítást, bár számos magánértesülés arra utal, hogy ez megtehető lehetne.

A robbantási helyek (bányák) környezetében levő épületeken előbb-utóbb épülethibák jönnek létre, melyeket, ha a tulajdonos érzi az elvégzett robbantások rezgéseit, előbb-utóbb összefüggésbe hozza a robbantások hatásaival. Amennyiben a robbantást végző a bejelentést követően a kárt nem ismeri el, építész szakértő által felvett kárbecsléssel ellátott beadvánnyal a bírósághoz

fordul. Általános, hogy az első pert kis számú, esetleg egyetlen ingatlantulajdonos indítja el (próba per). A bíróság az építész szakértői vélemény birtokában vagy újabb építész szakértői és szeizmikus szakértői vizsgálatot kér, vagy csak az utóbbit kéri. Általános, hogy az építész szakértő nem keresi a kár okát, csupán a felmérés alapján annak összegét állapítja meg, mivel a bíróság is csak ezt kéri. A szeizmikus szakértőtől a bíróság azt várja el, hogy állapítsa meg a rezgések nagyságát, és egyértelműen mondja ki, hogy a kár származhat-e a szeizmikus rezgéstől, vagy nem, tehát határozott „igen“-t vagy „nem“-et. Ennek megfelelően a szeizmikus szakértőnek a következő problémákkal kell megbírkóznia.

Először is a távolság és a töltetnagyság ismeretében meg kell határozni a  $v$  rezgési sebesség értékét, amely az ingatlanon jelentkezhetett. Mivel a 2.3. pont ezt részletesen tartalmazza, csupán annyi megjegyzést fűzünk ehhez, hogy kedvezőtlen esetben (nincs semmilyen mérési adat, pontatlanul ismert  $Q$  értéke, nagyon nagy a felrobbantott mennyiségek közötti különbség, következésként a  $Q^{1/2}/R$  értéket is pontatlanul lehet meghatározni, stb.) akár nagyságrendi tévedés is előfordulhat.

Mivel minden szeizmikus szakértő tudja, hogy a legkisebb rezgés is károsító, amennyiben a becsült rezgés közelít a még megengedhető rezgési sebesség értékhez, vagy azt meg is haladja, egyre jobban hajlik azt a kijelentést tenni, hogy a szeizmikus kár valószínű. Amennyiben nem tudja meghatározni a kár mértékét, vagy konkrét előfordulási lehetőségét (pl. a vakolati repedések hány százaléka keletkezhetett szeizmikus kárként), a bíróságot döntésképtelen helyzetbe hozza.

Mindezt nehezíti, ha az építész szakértő sem tudja feltárni azokat a kárt okozó építési vagy üzemelési hibákat, amelyek a rezgésektől függetlenül is kárt okoztak, vagy ha a két szakértő által valószínűsített károk okai, illetve értékei nem hozhatók egyensúlyba. Általános, hogy ilyenkor a robbantást végzőket



marasztalják el, tehát a perlekedő ingatlantulajdonos igazságtalan, viszont a megnyert per miatt jogos haszonhoz jut, melyet a robbantást végző fizet meg. A próbaper elvesztése beláthatatlan mennyiségű további pert hozhat maga után. A próbaper precedens értékű bírósági ítélete a további bírósági ítéleteket is befolyásolja érhető módon. Az ítéletek igazságos irányba való terelése új, körültekintőbb szeizmikus szakértő bevonásával is alig lehetséges. Ugyanígy alig képzelhető el, hogy olyan új építész szakértő is található, aki együttműködve a szeizmikus szakértővel a károk nem szeizmikus okát is képes kimutatni, a bíróság elé terjeszteni és az ítéletet befolyásolni. Ilyen esetben a két szakértő együttműködése a függetlenségük feladásával is járhat, mely jogilag is alig fogadható el. A két szakértő együttműködésére hazánkban már volt példa, mely megítélésünk szerint az akkori perben talán a lehető legigazságosabb ítéletet hozta [33,34].

## **6. Összefoglalás**

Az erősödő környezetvédelem, a települések terjeszkedése, az ember természetes igénye a nyugalomért egyre jobban előrehozza a robbantással, vagy más úton keltett rezgések csökkentésére irányuló törekvéseket. A robbantástechnika és -technológia ilyen irányba történő fejlesztése nem képzelhető el a robbantásoktól származó hullámok keletkezésének, terjedési törvényeinek és hatásainak ismerete nélkül. A környezetvédelem és a költségcsökkentés igénye feltehetően olyan kompromisszum keresésére fog irányulni, mely mérésekre alapított számításokat tartalmaz. Ez a tanulmány azt a célt szolgálja, hogy rámutasson azokra a kompromisszumokra, amelyekkel a robbantásoknál számolni kell, a robbantástechnológia szeizmikus méréssel történő ellenőrzési lehetőségére, korlátaira, más kiegészítő és szükséges adatgyűjtésre. A hullámok terjedésére vonatkozó ismeretek lehetővé teszik a kritikus helyek felmérését, az esetleges anomális viselkedés meghatározását és

értelmezését. Ugyanígy lehetővé válik a robbantások környezetében levő építményekre jutó rezgések nagyságának számíthatósága, az építmény viselkedésének és az építményre jutó rezgések károsító hatása által keltett kár mértékének becslése is. Ezek az ismeretek lehetővé teszik, hogy a robbantást végzők átfogó képet alakítsanak ki a bányá tévékenységének környezeti hatásairól, és megfelelő módon tudjon reagálni a kényszerítő körülményekre is.

## Megjegyzések

### [1. megjegyzés]

Az interferencia létrejöttéhez szükséges, hogy két

$$v_1 = A_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$$

$$v_2 = A_2 \cdot \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$$

hullám esetén teljesüljenek a következők:

$$\omega_1 = \omega_2; \quad A_1 = A_2; \quad \text{amikor is}$$

kioltás következik be, ha  $\varphi_2 - \varphi_1 = (2n+1) \cdot \pi$

kétszeres amplitudójú hullámot kapunk, ha  $\varphi_1 - \varphi_2 = 2n \cdot \pi$ .

A feltételek bekövetkezésének vizsgálatához tekintsünk két 25 Hz-es ( $T=40$  ms) hullámot. Az első hullám fáziseltolása  $\varphi_1=0$ , ha a  $t=0$  időpontot az elsőhullám felfutásának kezdetéhez rendeljük. Ennek a hullámnak a második félperiódusában legalább közelítőleg a  $t$  időtengelyre nézve  $\pi$  fázisszöggel eltolva tükörszimmetrikusnak kell lenni az első félperiódusra. Ennek fizikai feltétele, hogy sem az első, sem pedig a második félperiódusban disszipatív jelenségek ne befolyásolják a hullámalakot, vagy ha igen akkor közel azonos módon. Ez általában már nem teljesül. A második hullám első félperiódusa pontosan 20 ms ( $T/2$ ) időpillanatban kell, hogy induljon, és ennek a pontossága legalább 1-5% legyen, tehát  $\pm 0,2-1,0$  ms. Ez a pontosság pirotechnikailag időzített gyutacsok esetén egy-egy gyártási tételen belül egy időzítési fokozatban gyakorlatilag is elérhető, általában nem teljesül viszont, hogy a

névleges időzítési érték és a gyártásnál bekövetkező tényleges időzítési érték egybeesik, tehát a tényleges időzítési értékek nem a névleges időzítési értékek körül oszcillálnak. A tényleges időzítési különbségek a névleges értékektől mintegy 5-10 ms-mal is eltérhetnek [35]. Pirotechnikai időzítés mellett tehát igen valószínűtlennek mondható interferencia kialakulása. Elektronikusan időzített gyutacsok esetén az ismert mérési eredmények a hajlamot azonban igazolják azzal a hullámképpel, hogy a kis mérési robbantási távolságok esetén a hullámcsomag olyan jelleget vesz fel, mintha a gyutacs fokozatszám által meghatározott időtartam alatt egy harmonikus hullámhoz közelítő jelleg alakulna ki [36]. Ennek indoka azonban nem feltétlen az interferenciát közelítő jelenség, hanem inkább az, hogy a hullámkeltés pontos időközökben történt. Ma még nem ismert pontosan, hogy közzétípusonként milyen frekvenciájú hullámok várhatók, ezért az interferencia létrehozásához, illetve legalább a jelleg közelítéséhez valószínű sok megfigyelés szükséges.

Tapasztalataink szerint mechanikus rezgéskeltés esetén is csak közelítőleg harmonikus hullám kialakulása várható. Ilyen közel harmonikus hullám kialakulását két nagy fűrészüzemi gép által keltett vibráció vizsgálatánál tapasztaltuk. A két fűrészgép között kb.  $\frac{1}{2}$  Hz frekvenciakülönbség volt. Harmonikus hullám esetén ekkor a lebegés jelenségének fel kell lépni, melyet valóban tapasztaltunk még nagyobb távolságokban is [37].

## **[2. megjegyzés]**

Általában nem lehet frekvenciáról beszélni, hanem a hullámcsomag egy részének frekvenciájáról, így pl. az első, a második, vagy a harmadik szinuszjel periódusidejéből következő frekvenciáról.

## **[3. megjegyzés]**

Nincs tudomásunk arról, hogy a szelektív abszorpciós együttható létét

robbantás esetére közvetlenül kimutatták volna. A vibroseis réteggutatási eljárásnál azonban a vibrátorok 6-82 Hz frekvencia intervallumban folyamatosan változó frekvenciájú jelcsomagot juttat a talajba. Ezen szeizmogramok távolságfüggését vizsgálva adódott, hogy egy lazán kötött homokos talaj esetén a legkisebb csillapítási együttható kb. 20 Hz-nél jelentkezik. A frekvencia függvényében további minimumok jelentkeztek 38 és 65 Hz-nél, jó egyezésben az idevonatkozó elméletekkel.

#### [4. megjegyzés]

Ha a földrengés kipattanási helye hegyvidék, melyhez közel feltöltéses alföld van, az alföldön általában nagyobb károk tapasztalhatók.

#### [5. megjegyzés]

Tekintsük a kőbánya és az alluvium találkozási vonalát. Mindkét oldalon vegyük fel a szeizmogramot egymáshoz közel. Erre alkalmazzuk a (8) összefüggést, és azonnal osszuk el egymással:

$$\frac{4\pi R_1^2 \rho_1 c_1 \int_0^\infty v_1^2(t) dt}{4\pi R_2^2 \rho_2 c_2 \int_0^\infty v_2^2(t) dt} = \frac{E_1}{E_2} \approx 1$$

A reflexiók együttható által okozott változástól eltekintünk, melyet a  $\approx$  jellel jeleztünk. A mérési elrendezésnek megfelelően  $R_1 \approx R_2$ . Nem számolunk a kőzet és a talaj közti sűrűségkülönbséggel, tehát  $\rho_1 \approx \rho_2$ .

Lényegesen eltérnek viszont a  $c$  terjedési sebességek: kőzet esetén  $c_1 \approx 2000-2500$  m/s, míg talaj esetén  $c_2 \approx 300-1000$  m/s, következésként  $c_1/c_2 \approx 2 - 8$ . Az integrációs idő általában nem nő 1,5 -2-ször nagyobbra, így  $v_2$  értékének nőni kell. Az effektust a kőbányák mintegy 75%-ánál kimutattuk. A növekedés egy kőbánya esetén az 1,5-szeres csúcserték növekedést is elérte [11]. Vegyük

észre, hogy szó sincs a szeizmikus energia növekedéséről, ezért az esetleges károk a két különböző talajon ha eltérnek egymástól, annak okát nem a szeizmikus energia változásában, hanem az átviteli- és a válaszfüggvények különbözőségében kell keresni.

#### **[6. megjegyzés]**

Békés célú nukleáris robbantásokkal keltett szeizmikus hullám esetén a rezgési sebesség, távolság függésre külön-külön összefüggés ismert aszerint, hogy a hullámkeltés kőzetben, vagy alluviumban történt [38].

Alluvium esetén nagyobb rezgések keletkeznek. Oka feltehetően a hullámtorlódás. Az 1  $\mu$ s alatt lejátszódó nukleáris robbanás és az extrém nagy energia miatt még nagyobb mélységek esetén is a felszínig történő kifutás sebessége mintegy folyamatosan csökken. Nagyobb hangterjedési sebességgel rendelkező kőzet esetén a hullámtorlódás lehetősége egyre jobban csökken. Ennek magyarázatát az [5. megjegyzés] összefüggése is adja.

#### **[7. megjegyzés]**

A [3. megjegyzés]-ben említett vibrátorokkal lebontásra ítélt házak mellett végeztünk méréseket. Úgy tapasztaltuk, hogy egy kis, alig 75 m<sup>2</sup>-es ház a legnagyobb regésekkel a 12 Hz-es hullámokra reagál. A tokaji TV-adó ugyanezen sajátfrekvenciáját 2 Hz-ben határozták meg más úton. A kis családi ház esetén az első felharmonikus közelében (24 Hz) már nem volt kimutatható, hogy változás állt volna be a reagálásban. Mindezek alapján úgy tűnik, hogy az építmények saját frekvenciái 1-15 Hz tartományba esik, és legfeljebb az első felharmonikusnál lehet rezonanciára való hajlamot feltételezni, tehát a megállapított 1-30 Hz-es veszélyes frekvencia intervallum az egyes országok elfogadott szabványaiban helyes. Az e fölötti frekvenciájú rezgésekre az átviteli függvény erősen csillapító hatású, illetve a válaszfüggvény a rezonanciát kizárja.

## [8. megjegyzés]

A magyarországi előírások (ÁRBSz) szerint, ha a robbantások száma évi ötnél kevesebb, a  $v$  még megengedhető rezgési sebesség kiszámításánál a  $k=25$  érték a megengedett  $k=50$  helyett (Koch-képlet). Ezt úgyis értelmezhetjük, hogy ekkor a még megengedett rezgési sebesség értéke kétszerese lehet az V. táblázatban megadott értéknél. Egyes szabványok folyamatos rezgések esetére hasonlóan szabályozzák a még megengedhető rezgési értékeket. Svájcban pl. folytonos rezgés esetén a fele akkora rezgési sebesség a még megengedett irányadó érték, mint időszakos rezgések esetén [39].

## [9. megjegyzés]

A (15) függvény konkrét vizsgálatához két esetben kíséreltünk meg felhagyott épületen olyan rezgést létrehozni, amelynél kár kimutatható. A kísérletekhez sikerült viszonylag alacsony frekvenciájú, nagy rezgési sebesség értékű rezgéseket létrehozni. A beremendi kőbánya közelében egy felhagyott hétvégi házban a robbantással keltett rezgési sebesség  $42 \text{ mm/s}$  volt, a rezgés frekvenciája  $25 \text{ Hz}$ . Kárt detektálni nem sikerült. Tény azonban, hogy a falakon lerakódott por részben lerázódott, ezért valószínű, hogy nem kötött, vagy rosszul kötött vakolat lehullott volna. Meglévő vakolati repedések tovaterjedését nem sikerült megállapítani. Másik esetben vibrátorokkal kíséreltünk meg kárt létrehozni. Az elért rezgési sebesség ekkor  $30 \text{ mm/s}$  értékű volt  $12 \text{ Hz}$  frekvenciánál. Kárt egyértelműen itt sem lehetett detektálni. Ez esetben azonban a vizsgált épülettől kb.  $20 \text{ m}$ -re levő épületről egy kúpcserép leesett, melyről megállapítottuk, hogy a kötését biztosító vakolat már a kísérletek előtt elvált, így csak a súrlódás tartotta az eredeti helyén. A becsült rezgési sebesség itt  $5 \text{ mm/s}$  körüli érték lehetett.

Egy robbantásos betonbontási munkánál a robbantás közelében levő műszerház beton aljzatán  $95 \text{ mm/s}$  rezgési sebességet mértünk,  $100 \text{ Hz}$  rezgési

frekvencia mellett. Ekkor a rezgések az ablakkeretből egy tábla üveget kiráztak, mely egészben kiesett, és a betonaljzaton tört össze [40].

További hivatkozásként említjük meg, hogy a beremendi kőbányában egy melegedő épületet (alapterülete kb. 3\*4 m volt) kérésünkre csak akkor bontottak le, amikor az már a fűrási munkákat is zavarta, és a robbantási frontoktól mért legközelebbi távolsága alig haladta meg a 10 m-t. A becsült rezgési sebesség itt meghaladta a 100 mm/s értéket, a rezgések frekvenciáját pedig 30 Hz körüli értékben becsüljük. Sajnos távvezérelhető műszerek ekkor még nem álltak rendelkezésünkre. Szeizmikus károk itt már megfigyelhetők voltak: ajtó, ablak elválás, betonfödém-téglafal elválás, falazati repedések [40].

Ezek a megfigyelések arra készítetnek bennünket, hogy a III. és a IV. táblázat értékeit helyesnek fogadjuk el, melyből a lehetséges károk alsó határa becsülhető, illetve az irodalmi adatok legalább részben alátámasztottnak mondhatók.

#### **[10. megjegyzés]**

A 15-30 mm/s intervallumban a falak egy részének újravakolási költsége. A 30-60 mm/s intervallumban teljes újravakolás, néhány nyílászáró cseréje. A 60-120 mm/s intervallumban teljes vakolás, belső válaszfalak bontása, javítása, nyílászárók cseréje. A 120-240 mm/s intervallumban főfalak javítása, új födém és nyílászárók beépítése, új tető építése részben bontott anyagok segítségével. A 240-480 mm/s intervallumban bontás az alapokig, az alap megerősítése, új falak és tetőszerkezet építése részben a bontott anyagok felhasználásával. A 480 mm/s-nál nagyobb rezgéseknél teljes újjáépítés, kismértékű bontási anyag újrahaznosítható.

## [11. megjegyzés]

A számításhoz felsőmatematikai műveletek végzése szükséges. Ehhez HP-67 programozható zsebszámológépre írt programot basic programra írtuk át. A program első része lehetővé teszi, hogy a mért rezgési sebesség értékekkel meghatározzuk a (10) összefüggés  $k$  és  $n$  paramétereit, és ezzel a  $v$  rezgési sebességet számítsuk egy általunk meghatározott távolság intervallumra (10) összefüggés és a (11) Koch-képlet szerint. Bármely választott  $Q$  értékhez a  $P_1$ ,  $P_2$  és  $P_3$  valószínűségeket is adja a program, illetve  $Q$ -t intervallumban megadva a lépésköznek megfelelő számú táblázat készíthető mindhárom  $P$  értékre.

A mai modern gépeknél erre már nincs szükség. A számítások excel-ben minden további nélkül elvégezhetők, és táblázat készíthető.

## Irodalomjegyzék

- [1] Thum, W.: Über das physikalisch-mechanische Verhalten von Gestein unter Sprengwirkung. Nobel Hefte. Jg. 37. (1971).
- [2] Efremov, E.T.: K voproszū racionalnūj dlinū kolinki zarjada. 1057./14. 1965. Nyedra.
- [3] Kis M.: Die Entwicklung und der heutige Stand der Großbohrlochsprengungen in Ungarn. 21. int. Informationstag für Sprengtechnik. WIFI. Linz. 1990.
- [4] König, R.: Das Zünden mit elektronischen Zündern in Steinbrüchen. Nobel Hefte. Jg. 57. (1991.) H1.
- [5] Havermann, T., Vogt, W., Plaumann, G., König, R., Thomas, K.: Digitale Haufwerkanalyse von elektronisch gezündeten Sprengungen im Steinbruch Groß-Bieberau der Odenwälder Hartstein Industrie G.m.b.H. (OHI). Nobel Hefte. Jg. 61. (1995).
- [6] Kis M.: Etudes relatives au rote et au comportement du bourrage. Explosifs. Trimestriel. (1979).
- [7] Kis M., Koczor L.: Einige Bemerkungen über die seimische Wirkung der Sprengarbeiten. Mitteilung des ungarischen Zentralinstitut für die Entwicklung der Bergbaus. No.21. (1978).
- [8] Fogelson, D.E., Duwall, W.I., Atchinson, T.C.: Strain Energy in Explosion generated Stain Pulses. U.S. Bureau of Mines; Rep. Inv. No. 5514. (1959).
- [9] Bassa-Kun: Robbantástechnikai Kézikönyv. Műszaki Kiadó. Bp. 1956.
- [10] Kis M.: Talaj rezgésebbesség mérése Szeged város belterületén. 31-62/74 sz. Kutatási Jelentés. BKI. Tatabánya. 1975.



- [11] Kis M.: A nagyharsányi kőbánya szeizmikus adottságai. BKL. Bányászat. 109. Nr. Sp. 2. BKI. Közl. XX. évf. No.2. (1976).
- [12] Pucskov, Sz.V.: Vlijanije verchnevo sloja na intenzivnoszt szeizmicsezskich kolebanij pri zemletrasenijak. Szeizmicsezskie izsledovanija dlja stroitelsztva. Izd. Nauka. Moszkva. 1971.
- [13] Thomas, K.: Das Zünden von Großbohrlochsprengungen mit verbesserte Haufwerkzerkleinerung unter Vermeidung des Abschlagens von Sprenschnüren und mit verminderten Sprengerschütterungen. Nobel Hefte. Jg. 53. (1987). H.1/2.
- [14] Thum W.: Stand und Entwicklungstendenzen in der Gewinnungssprengtechnik über Tage. Fúrás-robbantástechnika 1995. Miskolc-Tapolca.
- [15] Lick, J.: Einsatz der Laser-Vermessungsinstrumente für Bruchwandaufmessungen in Steinbrüchen. Fúrás-robbantástechnika 1995. Miskolc-Tapolca.
- [16] Kis M.: Nagyrobbantások tervezéséhez szükséges robbantástechnológiai elvek összefoglalása programozható kisszámítógépre. 31/100/76 sz. Kutatási Jelentés. BKI. Tatabánya. 1977.
- [17] Bohus G., Kis M.: Egy kőbánya környezetének szeizmikus problémái. BKL. Bányászat. 108.évf. Nr.Sp.1. BKI. Közleményei. XIX. évf. Nr.1. (1975).
- [18] Müller,B.: Praktische Ergebnisse von Großbohrlochsprengungen mit doppelte Zündung. Spreng. Info. Mitteilungsblatt des D.S.e.V. H.2. (1991).
- [19] Thomas,K.: Redundantes Zünden von langen Ladeseulen unter besondere Beachtung der auftretenden Sprengerschütterungen. Nobel Hefte. Jg. 61. H.1. (1995).
- [20] Bohus G.: Schutz der Kristallhöhle in Beremend gegen Sprengschäden. 22. Int Informationstag für Sprengtechnik. WIFI. Linz. 1991.
- [21] Kis M.: Abbruchmethodebei der die Vibrationen stark reduziert sind. 24. Int. Informationstag für Sprengtechnik. WIFI. Linz. 1993.
- [22] Általános Robbantási Biztonsági Szabályzat.
- [23] Hinzen, K.G., Reamer S.K.: Verringerung von Sprengerschütterungen durch Zünderoptimierung und elektronische Zünder - ein Bleispiel aus der Praxis. Nobel Hefte. Jg.57. H.2/3/4. (1991).
- [24] Kis M.: A vibroseis eljárással keltett felületi hullámokra vonatkozó biztonsági vizsgálatok. 31-58/76 sz. Kutatási Jelentés. BKI. Tatabánya. 1977.
- [25] Ormos T., Ferenczy L.: Felszinközeli robbantások épületekre, létesítményekre gyakorolt hatásának vizsgálata. IV. Nemzetközi Robbantástechnikai Konferencia. Balatonfüred. 1975.

- [26] Howels, D.A., Haigh, I.P., Taylor, C.: Dynamic Waves in Civil Engineering. John Wiley and Sons. L.t.d. London, New-York, Sydney, Toronto. 1975.
- [27] Rényi A.: Valószínűségszámítás. Bp. 1954.
- [28] Holzer F.: Ground Motion and Boulding Damage from Underground Nuclear Detonations. I.A.E. ATC. 81-6/6.
- [29] Gustavsson: Swedish Blasting Technique. S.P.I. Göteborg. Sweden. 1973.
- [30] Autoren Kollektiv: Handbuch Sprengtechnik. VEB. Deutsch. Verl. Grundstoffindustrie. Leipzig. 1975.
- [31] Kis M.: Seismische Wirkung der Sprengerschütterungen auf Gebäude. VII. Int. Sprengtechn. Konf. Balatonfüred. 1985.
- [32] HP.67. Ownershandbook. MATH.PACK.26.A.
- [33] Gyetvai J., Csák B.: Szakértői Vélemény a Cement és Mészművek Beremendi Gyára által végzett bányarobbantásoktól származó épületkárok és azok okainak vizsgálatáról. Műszaki Egyetem. Bp. 1983.
- [34] Kis M.: 292-012-3-1120. sz. Szakértői Vélemény. Beremend község lakóházainak és a bánya környezetének károsodása a kőbányai robbantások miatt. KBFI. Tatabánya. 1979.
- [35] Kis M.: A gyutacsok időzítési hibájának hatása a robbantások által keltett rezgéshullámok sebességamplitudójára. 251-0059-1140-00 sz. Kutatási Jelentés. KBFI. Tatabánya. 1979.
- [36] Hinzen K.G.: Seismische Messungen bei Sprengungen mit elektronische Zündern. Nobel Hefte. Jg. 56. H. 1/2. (1990).
- [37] Mérési jegyzőkönyv és ennek kiértékelése a barcsi fűrészüzemben végzett rezgésmérésekről. (Készítette: Kis M. 1982.)
- [38] Kis M., Bohus G.: A nukleáris robbantások alkalmazási feltételeinek vizsgálata a recski mélyszinti ércbányában végzett bakteriológiai kilúgzáshoz. 251-092-9-1120-00 sz. Kutatási Részjelentés. KBFI. Tatabánya. 1979.
- [39] Erschütterungen. SN. 640312a. sz. Svájci szabvány.
- [40] Nem publikált eredmények.
- [41] Dr. Somosvári Zs.: Gyakori robbantások szeizmikus hatása lakóépületekre. Fúrás- robbantástechnika 1997. Miskolc-Tapolca. 1997.