



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék

Felületi keménység és szilárdságjellemzők összefüggéseinek vizsgálata
TDK dolgozat

Gyurkó Zoltán
BSc építőmérnök hallgató

Konzulensek:
Dr. Borosnyói Adorján
Szilágyi Katalin

Budapest, 2011. október 28.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
1.1 Előzmények.....	2
1.2. Célkitűzések.....	2
2. Irodalomkutatás.....	3
2.1 A keménység általános fogalma	3
2.2 A keménységmérés története	3
2.3 A keménységmérési módszerek csoportosítása	4
2.4 A keménységmérés kontaktmechanikai alapjai	4
2.5 Keménységmérés statikus benyomódás vizsgálattal.....	5
2.6 A Meyer-féle hatványtörvény	12
2.7 A Brinell-keménység maximum pontjának meghatározása.....	13
2.8 A fajlagos benyomódási munka számítása Brinell-keménység mérésnél	14
2.9 Keménységmérés mélységérzékeny benyomódás vizsgálattal	15
3. Saját vizsgálatok	18
3.1. Vizsgálati módszerek	18
3.1.1 Brinell keménységmérés	18
3.1.2 Mélységérzékeny benyomódás vizsgálat	18
3.1.3 Porozitás mérés	18
3.1.4 Nyomószilárdság mérés	21
3.1.5 Rugalmassági modulus vizsgálata	21
3.1.6 Keménységmérés rugalmas visszapattanás elvén	22
3.2. Vizsgált anyagok.....	22
3.3. Vizsgálati eredmények.....	23
3.3.1 Bevezetés	23
3.3.2 Összefoglaló adatok	25
4. Vizsgálati eredmények értékelése	55
4.1 Bevezetés	55
4.2 Rugalmas és disszipálódott energia kapcsolata DSI vizsgálatból.....	57
4.3 Meyer-féle hatványtörvények értékelése	59
4.4 A Brinell-keménység a terhelőerő függvényében.....	64
4.5 A szilárdság, a rugalmassági modulus és a keménység kapcsolata	66
4.6 A keménységmérés energiaelvű megközelítése.....	69
5. Összefoglalás	71
6. Jövőbeni kutatás.....	73
7. Köszönetnyilvánítás	74
8. Felhasznált irodalom	75

1. Bevezetés

A felületi keménységmérés már több évszázada fellelhető az anyagvizsgálatok között, melynek célja általában a vizsgált anyag szilárdsági jellemzőinek gyors és egyszerű meghatározása, anélkül, hogy az anyagban maradandó károsodást okoznánk. A felületi keménységre nem adható mindenki által elfogadott, általános definíció. Kutatásom során különböző anyagok keménységét vizsgáltam több módszerrel, valamint az ezzel kapcsolatba hozható egyéb anyagjellemzőket. Jelen dolgozat tartalmazza a vizsgálatok eredményeit és értékeléseit, valamint az eredmények alapján levonható következtetéseket.

1.1 Előzmények

Számos kutató foglalkozott már a felületi keménységmérés témakörével, köztük Hertz (1881), Brinell (1901), Timoshenko (1953) és Johnson (1985). Az ő eredményeiket tanulmányozva és felhasználva indítottam el saját kutatásaimat, amely elsősorban a Brinell-féle keménységvizsgálattal foglalkozik. Brinell-féle vizsgálatokat a 20. század eleje óta végeznek, először csak fémekre alkalmazták, majd a 20-as évektől kezdve kőszertű anyagokra is kiterjesztette a vizsgálatot az Egyesült Államokban Creeps és Mills (1923), Belgiumban Dutron (1927), Olaszországban Vandone (1933) és Sestini (1934), valamint Németországban Gaede és Steinwede (1937) (Szilágyi, Borosnyói, 2008; Szilágyi *et al*, 2011).

Ezután a viszonylagos eredménytelenség és a megfelelő technológia hiányában háttérbe szorult ez a vizsgálati forma és csak a 80-as években került újra előtérbe, amikor az adatok megfelelő feldolgozásához és értékeléséhez már megfelelő informatikai háttér állt rendelkezésre. A 2000-es években kezdett kutatásba a témával kapcsolatban Szilágyi és Borosnyói, akik által elért eredményeket szintén felhasználtam a munkám során.

1.2. Célkitűzések

A TDK dolgozatom célja különböző anyagok elsősorban Brinell-készülékkel meghatározott felületi keménységének és egyéb tulajdonságainak összehasonlítása, valamint ezek között megfelelő összefüggés megadása volt. A vizsgálataim során össze kívántam hasonlítani a Brinell-féle keménységmérés eredményeit a mélységérzékeny benyomódás (Depth Sensing Indentation, DSI) vizsgálatból kapott adatokkal.

Ezek mellett célom volt a Meyer-féle hatványfüggvények részletes tanulmányozása, illetve a közelmúltban betonok Brinell keménységi vizsgálata során tapasztalt jellegzetességek tanulmányozása egyéb kőszertű anyagokon.

2. Irodalomkutatás

2.1 A keménység általános fogalma

A keménység a szilárd anyagok tulajdonsága, amellyel az anyag állapota minősíthető. A keménység meghatározására a legjobb megfogalmazás a következőképpen írható le: A keménység az az ellenállás, amelyet a szilárd anyagok kifejtene a velük kölcsönhatásba kerülő, illetve beléjük hatoló vizsgálószerszámmal szemben. Ez a leírás utal a keménységmérés lehetőségeire, de nem konkrét definíció, mivel a keménység annyiféleképpen definiálható, ahány vizsgálat létezik. Más jelent a keménység a különböző szakterületek számára; például a fémiparban deformációval szembeni ellenállást, egy geológusnak karcollással szembeni ellenállást, egy építőmérnök számára elsősorban behatolással szembeni ellenállást jelent. Több fizikai jellemzővel is szoros kapcsolatban áll, köztük a rugalmassági modulussal, a szilárdsággal, a szívósággal, a csillapítóképességgel.

Hétköznapi szóhasználatban kijelenthetjük, hogy két test közül az a keményebb, amelynél egy harmadik test hatása azok felületén ugyanolyan behatolási mélység esetén nagyobb ellenállást fejt ki, vagy másképp megfogalmazva, amelyiken azonos erő hatására kisebb benyomódás keletkezik. (Meyer, 1908).

2.2 A keménységmérés története

A keménységmérés az első anyagvizsgáló típus, amelyet már a geológusok és mérnökök az 1600-as években is használtak. Ezek elsősorban különböző karcolló vizsgálatok voltak (Barba, 1640; Réaumur, 1722; Mohs 1812).

Ezek közül a legelterjedtebb a Mohs-féle keménységi skála, amely csak relatív értékeket ad meg (minden ásvány karcollja a nála puhábbat). A Mohs-keménységi skálát alkotó ásványok a következők:

1. talk, zsírkő (körömmel megkarcollható)
2. gipsz (körömmel megkarcollható)
3. kalcit (rézpénzzel megkarcollható)
4. fluorit (késsel megkarcollható)
5. apatit (üveggel megkarcollható)
6. ortoklász, földpátok (az üveget karcollják)
7. kvarc (az üveget és a földpátokat karcollja)
8. topáz (az üveget és a kvarcot karcollja)
9. korund (az üveget és a topázt karcollja)
10. gyémánt (a legkeményebb valamennyi ásvány közül)

2.3 A keménységmérési módszerek csoportosítása

A kutatók nagyon sokfajta keménységmérési eljárással kísérleteztek, ezek jó része a gyakorlatban jól alkalmazhatónak bizonyult. A keménységmérő eljárások négy csoportba sorolhatók (Chandler, 1999):

- *Szúró keménységmérés:* a vizsgálandó anyagnál jóval keményebb, ún. szúrószerszámot nyomnak megfelelően megválasztott terheléssel az anyagba, és a létrejövő benyomódás átmérőjéből vagy a benyomódás mélységéből származtatják a keménységi mérőszámot. Példa: Brinell, Vickers, Rockwell módszer.
- *Ejtő keménységmérés:* a keménység e vizsgálatok esetében egy, az anyagra ejtett mérőtest visszapattanási magasságából vagy sebességéből határozható meg, amely az ütközés rugalmas energiájával összefüggő mennyiség. Példa: Leeb készülék, Schmidt kalapács.
- *Rezgő keménységmérés:* a vizsgálandó anyagra szorított rezgőfej rezgésben tartásához szükséges energia méréséből fejezhető ki az anyag csillapítóképességével összefüggő keménységi mérőszám.
- *Karcolási keménységmérés:* a vizsgált anyag felületét egy másik (ismert keménységű) anyaggal karcoljuk, így a karcolatból megállapítható összehasonlítás alapján fejezhető ki a felületi keménység. Példa: Mohs skála.

A keménységmérő vizsgálatok nagy előnye, hogy ezek úgynevezett roncsolásmentes vizsgálatok (NDT: non-destructive testing), tehát a vizsgálat során nem keletkezik nagymértékű károsodás a vizsgált mintán.

2.4 A keménységmérés kontaktmechanikai alapjai

A kontaktmechanika területén nagyon fontos munkát végzett a német mérnök és kutató Heinrich Hertz, aki többek között leírta a rugalmas anyagok érintkezésekor és ütközésekor fellépő folyamatokat matematikailag. Az ő kutatásai szolgáltak alapul a későbbiekben megjelenő úttörőnek számító elméletekhez is. Hertz olyan analitikus megoldást adott, amely rugalmas testekkel foglalkozott. Ennek az elméletnek a segítségével az érintkezési pont közvetlen közelében határozhatóak meg a feszültségek, távolabb nem. Hertz kutatásainak az volt az elsődleges célja, hogy meghatározza a két érintkező felület alakját, az érintkezési pontban. Felvetése alapján az anyagoknak ki kell elégíteniük a következő peremfeltételeket:

- a kialakuló alakváltozásoknak és feszültségeknek ki kell elégíteniük a rugalmas testek egyensúlyának differenciálegyenletét és a feszültségeknek meg kell szünniük nagy távolságban az érintkező felületektől – ez azt jelenti, hogy a feszültségek lokálisak,
- a testek súrlódásmentesen érintkeznek,
- a testek felületén a normálfeszültség nulla az érintkezés körvonalán kívül,
- az érintkezés körvonalán belül a két test felülete közötti távolság nulla, a körön kívül pedig nagyobb, mint nulla,
- az érintkezés körvonalán belül a nyomáseloszlásnak az érintkezés körvonala által határolt területre vonatkoztatott integrálja adja a két test között ébredő erőt.

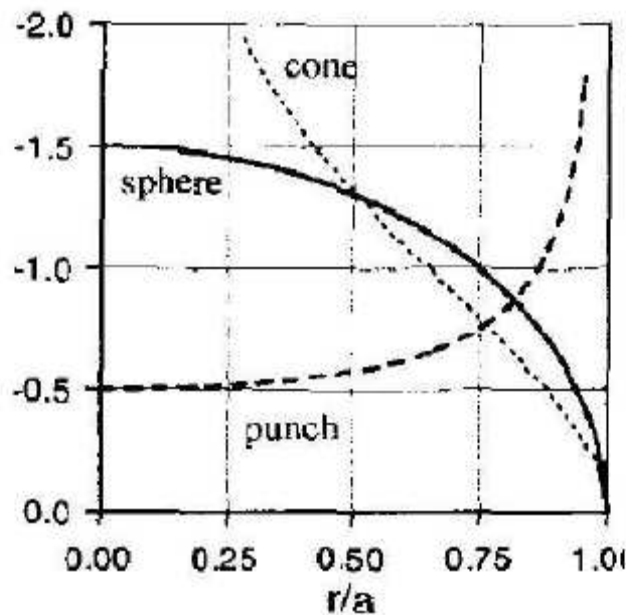
A felsorolt feltételek betartásával már egy matematikailag kezelhető feladatot kapunk. Hertz ennek segítségével általánosítani is tudta a problémát oly módon, hogy egy másodfokú függvényként vette fel a két érintkező test kapcsolódó vonalát.

A 4. feltétel és a két érintkező test másodfokú felülete együttesen definiálják az érintkező felület alakját. A két érintkező testet rugalmas, végtelen féltérnek tekintette.

A későbbi rugalmas elemzések is általában végtelen féltér modellen alapultak. Az elektromos potenciál elméletének analógiájából Hertz azt a következtetést vonta le, hogy egy ellipszoidikus nyomáeloszlás kielégítené a probléma peremfeltételeit, és úgy találta, hogy gömbök esetében a normálfeszültség (σ_z) eloszlása:

$$\frac{\sigma_z}{p_m} = -\frac{3}{2} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad r \leq a$$

A fenti összefüggés alapján az a következtetés vonható le, hogy a nyomáeloszlásnak maximuma van az érintkezési felület középpontjában, ahol a nyomás az átlagos érték 1,5-szerese, valamint a széleken ($r = a$) nullára csökken.



2.1 ábra: Kontakt nyomófeszültség eloszlása különféle alakú szűrőszerszámok esetében (Fisher-Cripps, 2000)

A közbenső pontokban Hertz nem számított feszültségeket, de javaslatot tett ezeknek az értékeknek a meghatározására az általa számított pontok interpolálásával.

Hertz elméletét továbbgondolva először Huber 1904-ben, majd Fuchs 1913-ban, később pedig Moreton és Close 1922-ben számította ki a teljes feszültségmezőt részleteiben. Napjainkban elsősorban Sneddon integrál transzformációs eljárását alkalmazzák a normálfeszültség tengelyszimmetrikus eloszlásának meghatározására (Fisher-Cripps, 2000).

Rideg anyagokban azonban nem a normálfeszültség a legfontosabb, hanem a sugárirányú húzófeszültség a minta felületén, amely az érintkezési kör szélén éri el a maximális értékét. Ez az a feszültség, amely felelős azokért a kúp alakú repedésekért, amelyek ismerősek lehetnek annak, akinek már csapódott kő a szélvédőjének. Ezeket a repedéseket nevezik Hertz-féle repedéseknek.

2.5 Keménységmérés statikus benyomódás vizsgálattal

A keménység mérésére a 19. századtól kezdve több megoldást dolgoztak ki, amelyek vagy egy adott nagyságú terhelőerő és az általa létrehozott lenyomat felületének viszonyát tekintik mérőszámnak, vagy a mérőeszköznek az erő hatására létrejövő mélység irányú elmozdulását (Varga *et al*, 1999).

2.1 táblázat: Statikus benyomódási keménység meghatározása (Varga *et al*, 1999)

Szerző, név, műszer	Működési elv, összefüggés	Mérendő paraméter kiszámítási módszer és viszonyszám
Hertz (1881)	Gömb és mérendő anyag érintkezése a képlékeny maradó deformáció eléréséig vagy repedéséig.	$H_r = 6 \cdot \frac{P}{d^2} \cdot \pi$
Brinell-prés (1900)	Keményre edzett acélgolyó benyomása; Ø 1,25; 2,5; 5 vagy 10 mm 15,65-3000 kg; képlékeny lenyomat keletkezik.	A keménységet a lenyomat átmérővel számolja: $HB = \frac{2 \cdot F}{D \cdot \pi \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Shore monotron	Gyémántgolyó Ø 0,75 mm, vagy acélgolyó Ø 1/16"; 2,5 mm és a szabványos mélység; 0,045 mm	A keménység mértékét az a terhelés jelenti, amely szükséges a mérőtestnek szabványos mélységig történő benyomásához.
Ludvig (1907)	90°-os acélkúp benyomása az anyagba	A keménység mérőszámát a terhelőerő és a vetületterület adja meg
Rockwell és szuper Rockwell mérés (1922)	120°-os gyémántkúp vagy 1/2"; 1/4"; 1/8"; 1/16"-os acélgolyók benyomása terhelésekkel; 150-100-60 kg vagy a szuper Rockwell esetén 45-30-15 kg	A keménység meghatározása a benyomódási mélység alapján történik, figyelembe véve az előterhelés hatását
Vickers mérés (1925)	136°-os lapszögű gyémántgúla benyomása 1-120 kg terheléssel.	A keménységet a terhelés és a benyomódás felületének viszonya adja: $HV = 1,854 \frac{F}{d^2}$
Drozd (1958)	P golyóterheléssel méri a benyomódás h mélységét és az anyag folyáshatárából d-vel számítható erőértéket levonva kapja a keménységet.	$H = \frac{P - P \cdot s}{H \cdot \pi \cdot h}$
Káldor M-Bárczy P. (1967)	Vickers normálkeménységet határoznak meg az anyagra jellemző n érték segítségével és ez a HN (normál-keménység) független a terhelőerőtől.	$HN = 1.8544 \cdot \frac{P}{d^n}$
Brunner, G.G.- Schimmer L. (1978)	A paraboloid geometriájú gyémánt benyomódó test benyomódási mélységét méri az erő függvényében és az a kapcsolat lineáris, függetlenül az anyag minőségétől	$HW_{szil} = \frac{F_p(y)}{y}$ ill. $HW_{szil} = C \cdot \left(1 - \frac{y_0}{y}\right)$ y ₀ max. behatolási mélység y maradó behatolási mélység C gépállandó

Napjainkban a felületi keménység mérésére leggyakrabban használt módszer, az ún. szűrő keménységvizsgáló eljárás. A vizsgálatok során a vizsgálandó anyagba egy meghatározott méretű, anyagú, alakú tárgyat nyomnak ugyancsak előre meghatározott erővel és ideig. Ez az előre meghatározott alak lehet gúla, henger vagy golyó. A mérőtest keménységét szabványok írják elő.

A legelterjedtebb szűrőkeménység vizsgálatok a Brinell-, Vickers- és Rockwell-féle keménységmérő eljárások.

A Brinell-módszer esetén egy edzett, polírozott acélgolyót nyomnak meghatározott terheléssel és adott ideig a vizsgálandó anyagfelületbe. Mivel a terhelés és a létrejövő gömbsüveg-geometriájú lenyomat felülete egymással nem arányos, a szűrőszerszámot és a terhelést szabványosítani kellett.

A keménységet a terhelés és a létrejött gömbsüveglenyomat felületének hányadosaként definiálják:

$$HB = \frac{F}{D\pi h}$$

A gömbsüveg magasságát (h) méréssel nehezen lehet meghatározni, de a golyó átmérőjéből (D) és a benyomódás átmérőjéből (d) kiszámolható:

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

Így:

$$HB = \frac{F}{D\pi h} = \frac{F}{D\pi \left(\frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right)} = \frac{2F}{D\pi(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Ahol:

F – terhelő erő

D – golyóátmérő

d – benyomódás átmérő, két egymásra merőleges átmérőt kell lemérni, majd ezek számtani közepét venni

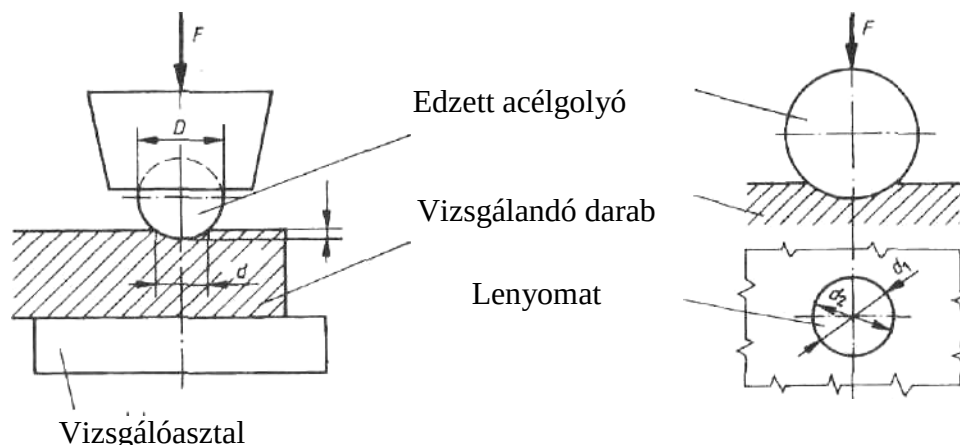
h – benyomódás mélysége

Az erőt az SI mértékegység rendszer bevezetése előtt kp -ban, a geometriai méreteket pedig mm -ben helyettesítették be és az így kapott mérőszámnak kp/mm^2 volt a mértékegysége. Az SI mértékegység rendszerre való áttérés után az erőt N -ban kellett behelyettesíteni, ami a keménység nagyságrendekben való megváltozását okozta volna.

Annak érdekében, hogy megőrizték az eredeti keménység nagyságrendjét, bevezették a 0,102-es szorzótényezőt a számlálóban. Ennek megfelelően a keménység meghatározásának összefüggése az alábbiakban módosult:

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{D \cdot \pi \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

ahol a terhelőerő N -ban van behelyettesítve, a geometriai jellemzők mm -ben. E változtatásoknak köszönhetően megmaradt a régi keménységérték nagyságrend, de a módosítások miatt az előbbi összefüggésből kapott mérőszámot mértékegység nélküli mérőszámnak kell tekinteni.



2.2 ábra: Brinell-keménység mérés elvi ábrája (Kecskés, 2010)

A golyó a mérendő anyag vastagságától függően 10 (csak 6 mm vastagság felett); 5 (6 és 3 mm között is); 2,5; vagy 1,25 (2 mm alatti) mm átmérőjű lehet. A vizsgálathoz használt különböző típusú golyók közül az 1; 2; 2,5; 5 és 10 mm átmérőjűek a szabványosak. Azt, hogy milyen átmérőt használunk, a vizsgálandó anyag határozza meg. Például vékony lemezek (fém) esetén, ha nagy átmérőjű golyót használunk, előfordulhat, hogy a benyomódás átmérője túlságosan kicsi lesz és így nem mérhető pontosan, vagy a mérőgolyó túl mélyen hatol a tárgyba és a valóságtól eltérő eredményt kapunk, mivel a mérést befolyásolja a mintát tartó alátét anyaga is. Ez utóbbi okból a próbatestnek legalább akkorának kell lennie, hogy a vizsgálat során a benyomódás a minta hátoldalán semmilyen alakváltozást ne okozzon. Erre ökölszabályként kimondható, hogy a próbatest minimális vastagsága a benyomódási mélység legalább tízszerese legyen (Gillemot, 1967).

A próbatest minimális vastagsága és a vizsgáló golyó átmérője közötti kapcsolatra vonatkozó javaslatot az alábbi táblázatban találjuk:

2.2 táblázat: Az egyes anyagvastagságokhoz ajánlott golyóátmérő (Kecskés, 2010)

Az anyag vastagsága, v [mm]	A vizsgáló golyó átmérője, D [mm]
$v \geq 8$ mm	10 mm
$8 \text{ mm} \geq v \geq 4$ mm	5 mm
$4 \text{ mm} \geq v \geq 2$ mm	2,5 mm
$2 \text{ mm} \geq v \geq 0,8$ mm	1 mm

A vizsgálandó anyagfajtaéhoz igazodva a terhelés $1D^2$ (ón, ólom), $2,5D^2$ (ón-antimon, ólom-antimon ötvözetek, azaz csapágyfémek), $5D^2$ (Al-Zn ötvözet és Cu-ötvözetek), $10D^2$ (Al, Cu- és Ni-ötvözetek), vagy $30D^2$ (vasötvözetek) lehet (amelyet kp -ban kell érteni, ha a golyóátmérőt (D) mm-ben helyettesítjük). A golyó átmérőjének és az alkalmazandó terhelésnek a megválasztásakor tekintettel kell lenni arra is, hogy a benyomódás átmérője $0,25 \dots 0,6D$ között maradjon. A vizsgálati időtartamot a várható keménységtől (anyagminőségtől) függően kell megállapítani. Az elv az, hogy minél lágyabb az anyag, annál hosszabb időre van szükség arra, hogy a benyomódás mélysége már ne változzon. Kemény anyagoknál (vasalapú ötvözetek) ez általában 15 másodperc, lágy anyagoknál (ón, ólom) akár 2 perc is lehet.

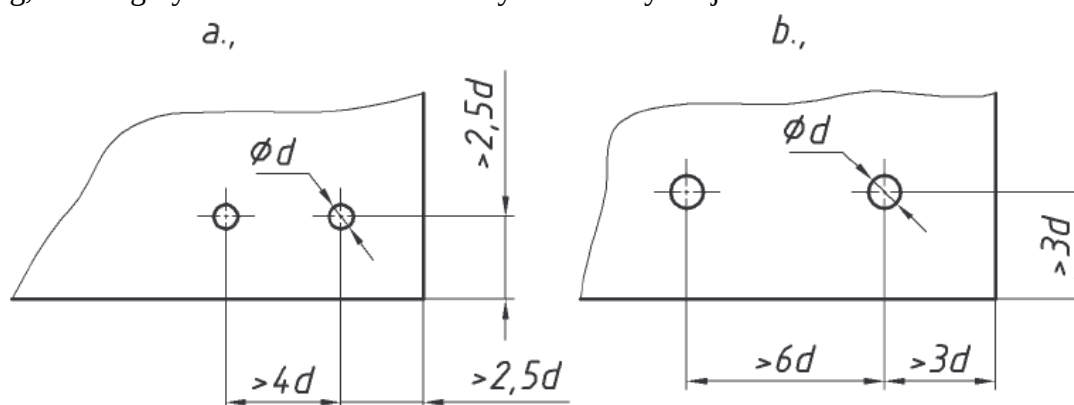
A terhelést lökés és rezgésmentesen kell közölni a próbatesttel. A terhelési idő, mint a mérési eredményt befolyásoló paraméter, függvénye a vizsgált anyagnak. A vizsgálat során a statikus szakaszban olyan hosszán kell fenntartani a terhelést, hogy értékelhető lenyomatot kapjunk.

Keményebb anyagoknál rövid idő alatt kialakul az értékelhető lenyomat, mint lágyabb anyagok esetén. A 2.3 táblázatban különböző anyagok ajánlott terhelési idő értékeit találjuk.

2.3 táblázat: Ajánlott terhelési idő értékek különböző anyagokhoz (Kecskés, 2010)

A vizsgált anyag	Terhelési idő, t [s]
Vas alapú ötvözetek, nikkelötvözetek, titánötvözetek	10...15
Színes és könnyűfémek esetén	30...60
Lágyforrasztó anyagok, ón, ólom és ötvözetek	120...180

A vizsgálat során a keletkezett gömbsüveg felület átmérőjének a mérése két, egymásra merőleges irányban történjen. Az így mért értékek számtani közepe lesz a keménységet meghatározó érték. A golyónyom leolvasáshoz rendszerint egy mikroszkópos mérőműszert kell alkalmazni. A golyónyom közepe a munkadarab szélétől legalább $2,5d$ távolságra legyen vasötvözeteknél és rézötvözeteknél, míg könnyűfémeknél ez a távolság legalább $3d$ legyen. Ha több mérés történik, akkor a két benyomódás közötti távolság az előzők szerint $4d$, ill. $6d$. E szabályok betartására azért van szükség, mert a golyó által okozott felkeményedés befolyásolja az ezt követő méréseket.



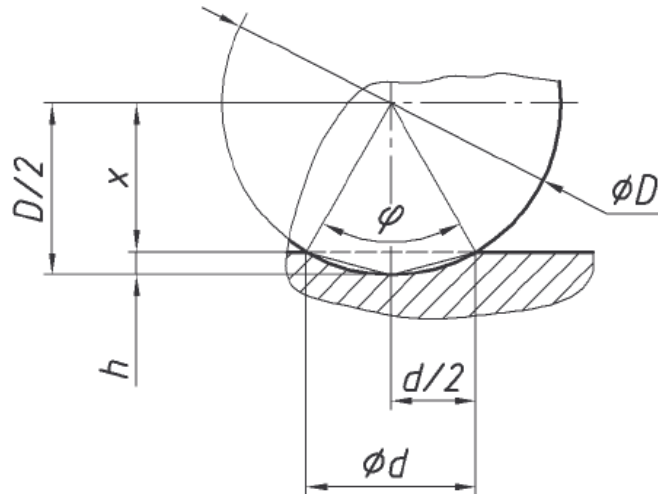
2.3 ábra: Lenyomatok távolsága a darab szélétől és egymás között (Kecskés, 2010)

A Brinell-keménységet - ha a golyó átmérője 10 mm, a vizsgálati terhelés 3000 kg és a terhelési idő 10...15 s - a keménység számértékével és *HB* jellel kell jelölni (pl. 255 *HB*). Egyéb esetben a *HB* jelet ki kell egészíteni a vizsgálat jellemzőit meghatározó számértékekkel (egymástól törtvonallal elválasztva), a következő sorrendben: golyóátmérő, mm; vizsgálati terhelés, kg; terhelési idő, s; pl. 185 *HB* 5/750/20.

A módszer 450 *HB*-nél kisebb keménységek mérésére alkalmazható a golyó deformálódása (a mérés torzítása) nélkül. Alakváltozás (deformálódás) esetén a golyót cserélni kell. Lehetőség van nagyobb keménységű (pl. keményfém) golyók alkalmazására is, de ez esetben már ún. módosított Brinell-keménységmérésről van szó, melynek jelölési módja *HBW*.

Speciális igényű (pl. 20°C-hoz képest meleg - 40...900°C-os - állapotú) keménység-meghatározás esetén szintén keményfém golyó használható.

Brinell benyomódás mélységének meghatározása:



2.4 ábra: A benyomódás mélységének és a keletkező lenyomat síkmetszetének kapcsolata (Kecskés, 2010)

Benyomódás mélysége:

$$h = \frac{D}{2} - x$$

Az x távolság értéke:

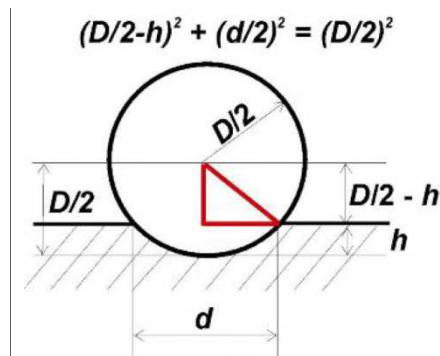
$$x = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{4}} = \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

Az összefüggést behelyettesítve az előző egyenletbe:

$$h = \frac{D}{2} - \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{2} = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

Ezt behelyettesítve a Brinell-keménység képletébe:

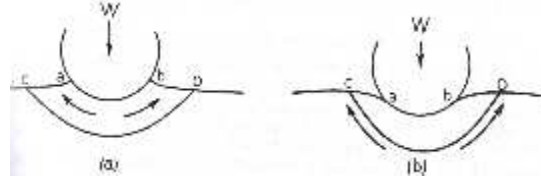
$$HB = \frac{F}{D\pi h} = \frac{F}{D\pi \left(\frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right)} = \frac{2F}{D\pi(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$



2.5 ábra: Lenyomat- és golyóátmérő valamint benyomódási mélység kapcsolata (Fisher-Cripps, 2000)

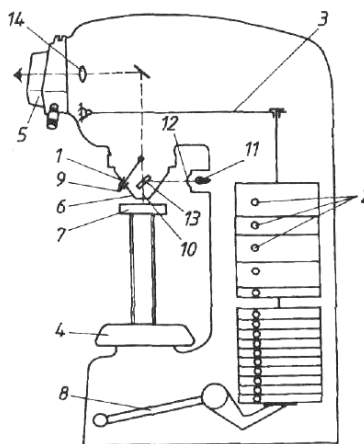
Brinell vizsgálatok során gyakran megfigyelhető jelenség a „besüllyedés” (sinking-in) vagy a „felgyűrődés” (piling-up) a golyó alakú alaktest körül. A golyó benyomódása során az anyag megpróbál kitérni előle, így az alaktest körüli képlékeny zónában jelentős oldalirányú elmozdulás lesz megfigyelhető. Ezeket a hatásokat figyelembe kell venni a golyónyom leolvasásakor, ugyanis ennek hatására nagyobb értéket olvashatunk le a valósánál.

A felgyűrődés a tökéletesen képlékeny anyagokra, elsősorban fémekre jellemző, de a jelenség megfigyelhető egyéb anyagokon is, például kerámiákon. A besüllyedés lágyabb anyagoknál figyelhető meg, ebben az esetben a benyomódó test körül az anyag is besüllyed (a nyomófej közvetlen környezetében) a golyóval együtt.



2.6 ábra: Besüllyedés és felgyűrődés jelensége (Tabor, 1977)

A 2.7 ábrán a Brinell-keménységmérő gép oldalnézeti vázlata látható. A billenthető mérőfejbe (1) a Brinell-keménységméréshez acél- vagy keménységfém golyót szerelünk. A gép oldalán található nyomógombokkal (2) állítható be a szükséges terhelés, amelyet egy karrendszer (3) közvetít a szűrőszerszámon keresztül a munkadarabra. A kézi kerékkel (4) pozícionálhatjuk a munkadarabot a méréshez. A rögzítő kúp (6) leszorítja a munkadarabot az asztalra (7). A gép oldalán elhelyezkedő kapcsoló benyomásával (8) bebillen a szűrőszerszám és a golyó a vizsgálati anyagba hatol. A terhelési idő letelte - a kar mozgásának megállása - után a kar automatikusan visszaáll az eredeti pozíciójába. Ezek után kivehetjük a munkadarabot a gépből, és nagyító illetve mikroszkóp segítségével megmérhetjük a golyónyom átmérőjét. A gép alaptartozéka egy tizedmilliméter beosztású vizsgáló mikroszkóp.



2.7 ábra: Brinell-keménységmérő gép (Chandler, 1999)



2.8 ábra: Brinell-keménységmérő gép

A Brinell vizsgálat helyes eljárási sorrendje:

- A szűrőszerszám átmérőjének meghatározása a vizsgálandó anyag vastagságának és szélességének figyelembevételével.
- A terhelőerő megválasztása a szűrőszerszám átmérőjének és az anyagának ismeretében.
- Terhelés időtartamának meghatározása az alakváltozást követő stabil állapot elérésének igényével.
- A keletkezett benyomódás átmérőjének ellenőrzése az érvényességi intervallum alapján.

A Brinell-keménységmérés egyik hibája, hogy az eredményt a vizsgálat körülményei jelentősen befolyásolják. A fontosabb befolyásoló tényezők:

- a golyó átmérője,
- a terhelőerő nagysága,
- a golyóátmérő és a vizsgált anyag vastagságának viszonya,
- a golyó benyomódásának mértéke,
- az erőtartás időtartama,
- a lenyomatok távolsága.

2.6 A Meyer-féle hatványtörvény

A Brinell-keménység nem független a terhelő erőtl. A kapcsolat a terhelő erő és a benyomódás mérete között, golyó alakú mérőfej esetén felírható empirikus összefüggésekkel. Meyer szerint, egy azonos méretű golyót ugyanabba az anyagba különböző erővel benyomva eltérő felületi keménységet kapunk (Meyer, 1908). Ezt fejezi ki a róla elnevezett határtörvény is:

$$F = a \cdot d^n$$

Ez az egyenlet a terhelő erő és a benyomódás átmérője között teremt kapcsolatot. Az a és n paraméterek anyagjellemzők. A szakirodalomban fellelhető adatok alapján az n kitevő értéke általában nagyobb, mint 2 és legtöbbször 2 és 2,5 közé esik. Az irodalomból kideríthető, hogy az n értéke teljesen megmunkálatlan anyagok esetén 2,5-höz közeli, míg jól megmunkált anyagoknál közel 2-nek tekinthető.

Ha középértéknek $n = 2$ értéket veszünk fel, a hatványtörvény segítségével könnyen bizonyítható:

$$d^2 = \frac{F}{a}$$

Az összefüggést behelyettesítve a Brinell-keménység képletébe:

$$HB = \frac{2F}{D \cdot \pi \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - \frac{F}{a}} \right)}$$

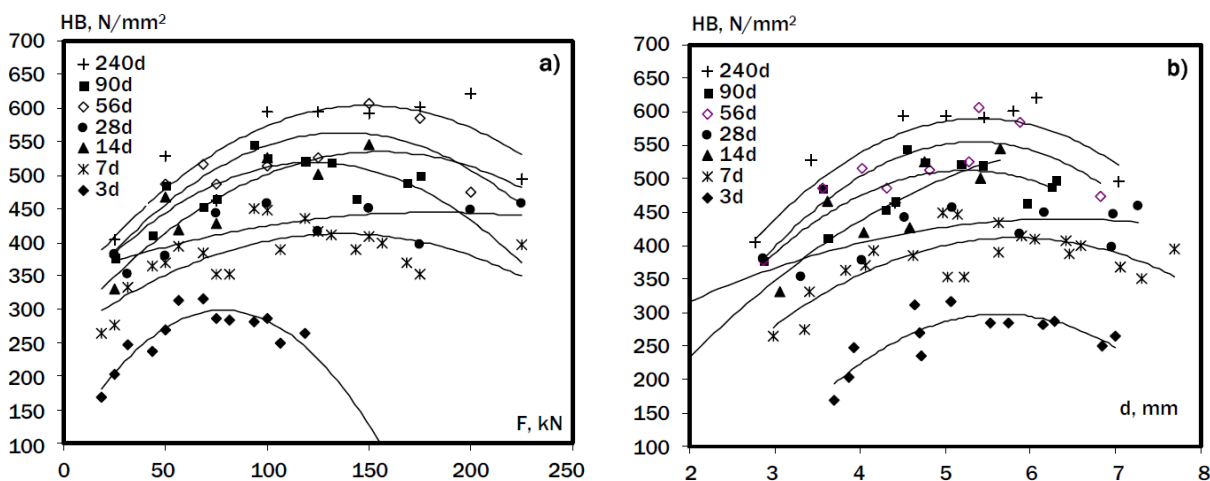
Megfigyelhető, hogy mivel a behelyettesítés után sem esik ki F , így a keménység értéke az erőtől függő érték (Meyer, 1908).

Az eredmények kiértékelése során az anyag Brinell-keménysége mellett felírható annak Meyer-keménysége is, amelynél a golyóbenyomódási gömbsüveg felülete helyett a kör alakú benyomódás átmérőjéből számítható felülettel osztjuk a terhelő erőt. Ha az így kapott értékeket a benyomódási átmérő vagy a terhelő erő függvényében ábrázoljuk, ugyancsak megállapítható, hogy a terhelő erő nagyságától függ a keménységi mérőszám betonok esetében is (Szilágyi *et al*, 2011).

2.7 A Brinell-keménység maximum pontjának meghatározása

A szakirodalomban az elmúlt években megfigyelték betonokon, hogy a keménységi mérőszámok a terhelő erő növelése hatására egy ideig monoton növekvő tendenciát mutatnak, majd ezután monoton csökkennek. Ez a tendencia megfigyelhető a golyóbenyomódás függvényében is. Így maximum pontok állapíthatóak meg a görbéken, amelyek megmutatják, hogy mekkora terhelő erő esetén kapjuk a maximális keménységet. A maximum pontok elhelyezkedése függ a beton próbatest víz-cement tényezőjétől. Ha a víz-cement tényező nagyobb, akkor az ábrán a maximum pont kisebb erő értéken alakul ki. A benyomódás átmérőjével éppen ellentétesen játszódik le, tehát minél nagyobb a víz-cement tényező értéke, annál nagyobb benyomódás értéken alakulnak ki a maximum pontok.

A szakirodalomban megtalálható továbbá, hogy ez a viselkedés az eddig vizsgált anyagok közül csak a porózus anyagokra volt megfigyelhető, fémek esetében fokozatos felkeményedés tapasztalható (Szilágyi *et al*, 2011).



2.9 ábra: Terhelő erő illetve benyomódási átmérő és Brinell-keménység kapcsolata, (Szilágyi *et al*, 2011)

Kutatásom része ennek a megfigyelésnek egyéb anyagokra való kiterjesztése valamint a megfigyelés valóságának igazolása.

2.8 A fajlagos benyomódási munka számítása Brinell-keménység mérésnél

A szúrószerszám behatolása során a vizsgált anyag által kifejtett ellenállás mértéke bizonyos képlekeny alakváltozási munkával jellemezhető. Ennek nagysága természetesen függ a szúrószerszám geometriájától. Ebből adódóan célszerű lehet az egységnyi térfogat kisajtolásához szükséges munkát, a fajlagos benyomódási munkát bevezetni különböző szúrószerszámok esetén. Ha egy D átmérőjű golyót a vizsgálandó anyagba h mélységig fokozatosan növekvő F erővel nyomunk, akkor a végzett munka:

$$W = \int_0^h F \cdot dh$$

A Brinell-keménység számértéke a D átmérőjű golyó benyomásához használt F nagyságú erő és a lenyomatként keletkezett d átmérőjű gömbsüveg felületének aránya:

$$HB = \frac{F}{D\pi h} = \frac{F}{2R\pi h}, \text{ mivel } h = R - \sqrt{R^2 - r^2} = \frac{1}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2}) = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \right), \text{ így}$$

$$HB = \frac{2F}{D\pi(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{2F}{D^2\pi \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \right)}$$

A Brinell-keménység vizsgálata esetén a golyó benyomásához használt erőt (F) és a golyó átmérőjét (D) úgy választjuk meg, hogy $0,25 \leq d/D \leq 0,6$ teljesüljön.

$d/D \leq 0,7$ esetén közelítéssel elfogadható: $1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{d}{D}\right)^2$, tehát

$$HB = \frac{2F}{D^2\pi \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \right)} \approx \frac{2F}{D^2\pi \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{d}{D}\right)^2} = \frac{4F}{\pi d^2}$$

A golyó benyomódása közben végzett alakváltozási munka Gaede (1952) publikációja nyomán:

$$W = \frac{1}{2} F \cdot h \approx \frac{1}{2} F \cdot \left[\frac{D}{2} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{d}{D}\right)^2 \right] = \frac{Fd^2}{8D}$$

A Brinell-keménységből kifejezve h értékét $HB = \frac{F}{D\pi h} \rightarrow h = \frac{F}{D\pi \cdot HB}$ adódik, hogy

$$W = \frac{1}{2} F \cdot h = \frac{1}{2} \frac{F^2}{D\pi \cdot HB} = \frac{C}{HB}$$

Tehát a golyó benyomásához szükséges energia fordítottan arányos a vizsgált anyag Brinell-keménységével. A Brinell-keménységből kifejezve F értékét $HB = \frac{F}{D\pi h} \rightarrow F = HB \cdot D\pi h$ adódik,

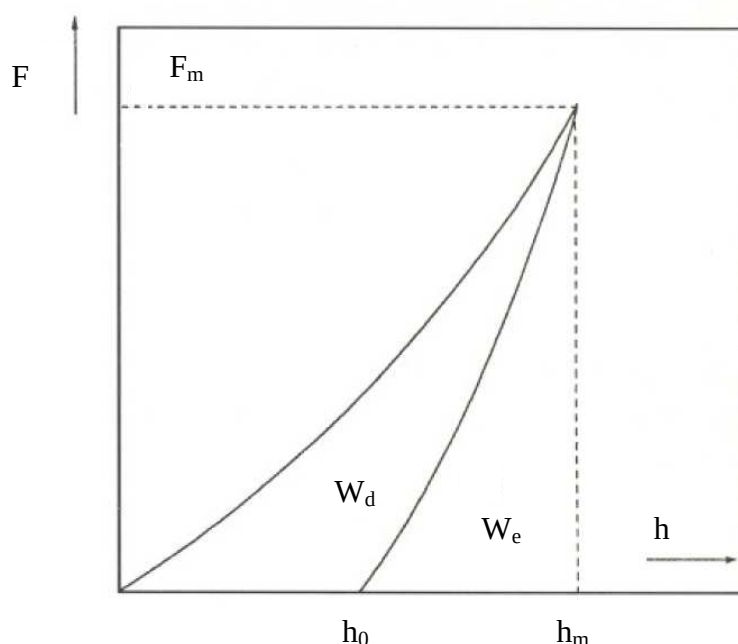
hogy

$$W = \frac{1}{2} F \cdot h = \frac{1}{2} HB \cdot D\pi h^2 = \frac{1}{2} HB \cdot D\pi \cdot \left[\frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \right) \right]^2 = \frac{1}{8} HB \cdot D^3\pi \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \right)^2$$

Az $1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{d}{D}\right)^2$ egyszerűsítéssel adódik, hogy $W \approx \frac{1}{32} HB \cdot D^3\pi \left(\frac{d}{D}\right)^4$

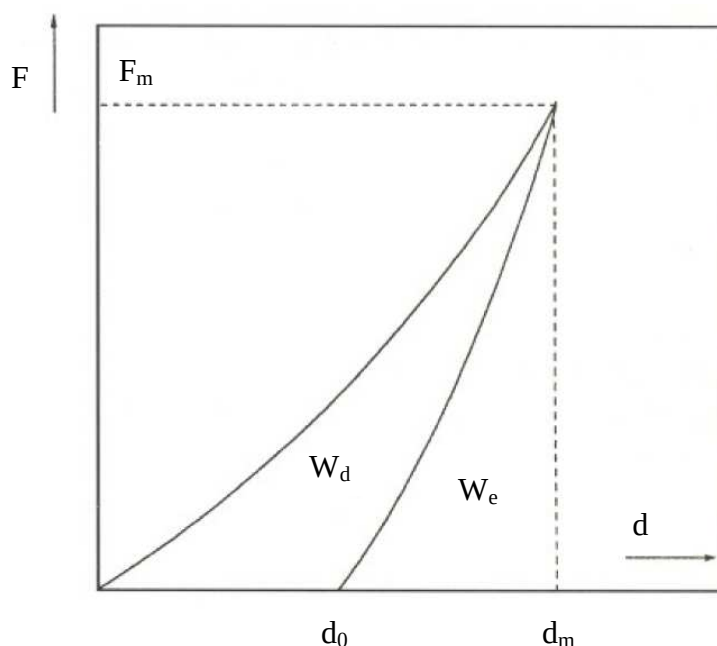
2.9 Keménységmérés mélységérzékeny benyomódás vizsgálattal

A mélységérzékeny benyomódás vizsgálat (Depth Sensing Indentation, DSI) széles körben használt vizsgálat az anyagok mechanikai tulajdonságainak meghatározására. A vizsgálat előnye többek között, hogy viszonylag kis mennyiség is elég az anyagból, nincs alakí kıkötés a mintadarabbal szemben, valamint a vizsgálat során nem tesszük tönkre az anyagot. Ez elengedhetetlen, ha a későbbiekben egyéb tulajdonságait is vizsgálni szeretnénk ugyanannak a mintadarabnak. A DSI vizsgálatnak két szakasza van. A terhelési periódus alatt a nyomófej behatol a minta felületébe állandó sebességgel, amíg el nem érjük a terhelő erő maximális értékét (F_m). A tehermentesítési szakaszban is ugyanekkora sebességgel távolodik el a mintától a nyomófej (2.10 ábra). A tehermentesítés során az anyag rugalmas alakváltozása megy végbe, amely során az előző szakasszal ellentétes irányú elmozdulások jönnek létre és a minta anyagától függően, a maximális benyomódásnál kisebb értéket kapunk végleges állapotban. Ebből a szakaszból következtethetünk az anyag rugalmas tulajdonságaira, többek között a rugalmassági modulusára. A rugalmassági modulus számítására a keménységmérés alapján a szakirodalomban csak néhány javaslat található, és a legtöbb a Sneddon által kifejtett Boussinesq problémán alapul (Sneddon, 1965). Sneddon teherbenyomódási mélység függvényeket határozott meg rugalmas féltérben különböző típusú nyomófejek esetére.

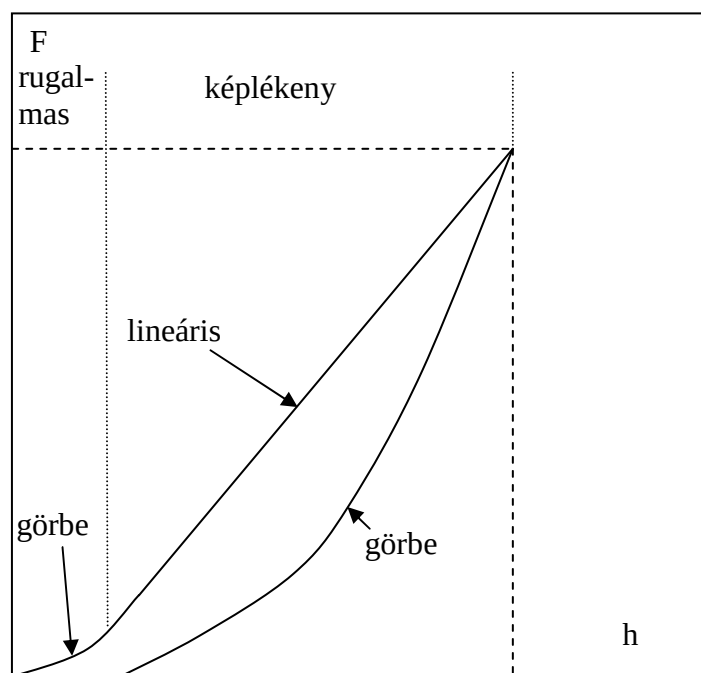


2.10 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) kapcsolata (elvi ábra)

A mélységérzékeny benyomódás vizsgálat során a számítógép vezérlésű gép az alaktestet állandó terhelési vagy benyomódási sebességgel a minta felületébe nyomja, majd ugyanekkora sebességgel kiemeli. A gép a mérés alatt a terhelőerő nagyságát és a benyomódási mélységet (elmozdulást) folyamatosan regisztrálja és felrajzolja az ún. benyomódási görbét (2.10 ábra).

2.11 ábra: Benyomódási átmérő (d) és terhelőerő (F) kapcsolata (elvi ábra)

A 2.11 ábra a terhelőerő és a keletkezett benyomódás átmérője közötti kapcsolatot mutatja be. A mérés első, terhelési szakaszában az erő folyamatosan növekszik a benyomódási nyom átmérőjének növekedésével, miközben az anyag a fej alatt rugalmasan és képlékenyen deformálódik. Az előre beállított terhelőerő (F_m) elérése után a fej állandó sebességgel kiemelkedik az anyagból. Az úgynevezett tehermentesítési szakaszon az anyagban lévő rugalmas feszültség egy része megszűnik. A tehermentesítés során a d értéke csak ideálisan rugalmas anyagok esetén csökken nullára, egyéb esetekben d_0 maradéérték keletkezik. A tehermentesítési folyamatból következtethetünk az anyag rugalmas tulajdonságaira. A 2.11 ábra szerinti függvény alakját Tabor (1951) adta meg részletesen elsőként. A terhelési szakasz egy görbével indul, amely az anyag rugalmas tulajdonságai miatt alakul ki, ezután az anyag belép a teljes képlékenységi tartományába, amelyben a függvény lineáris lesz. A tehermentesítési szakasz elsősorban az anyag rugalmas tulajdonságaitól függ, így a függvény alakja itt görbe is lesz.

2.12 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) kapcsolata

A 2.12 ábra szerinti függvény rugalmas szakaszai a következő összefüggéssel írhatóak le:

$$F = k \cdot h^{\frac{3}{2}}$$

ahol F a terhelőerő, h a benyomódási mélység, k az anyagjellemzőktől függő tényező. Ha ebbe az egyenletbe h -t d -vel helyettesítjük a következő összefüggés alapján:

$$h = \frac{D}{2} - \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{2} = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

megállapítható, hogy a terhelőerő és a benyomódási átmérő kapcsolata mindkét függvényszakaszon görbe lesz (lásd 2.11 ábra) (Tabor, 1951).

A terhelési görbe alatti terület megegyezik azzal a munkával, amelyet a maximális mélység eléréséig arra fordítunk, hogy az anyagot rugalmasan és képlékenyen deformáljuk, tömörítsük illetve repedéseket hozunk benne létre. Ezt a munkát nevezzük teljes munkának:

$$W_t = \int_0^{h_m} F_1 \cdot dh$$

Ahol W_t a teljes munka, h_m a maximális benyomódási mélység, F_1 a terhelő erő értéke a terhelési szakaszon.

A tehermentesítési görbe alatti terület az ún. rugalmas munka. Ez az a munkamennyiség, amelyet a tehermentesítés során visszanyerünk:

$$W_{el} = \int_{h_r}^{h_m} F_2 \cdot dh$$

Ahol W_{el} a rugalmas munka, h_m a maximális benyomódási mélység, h_r a maradó benyomódási mélység, F_2 a terhelő erő értéke a tehermentesítési szakaszon.

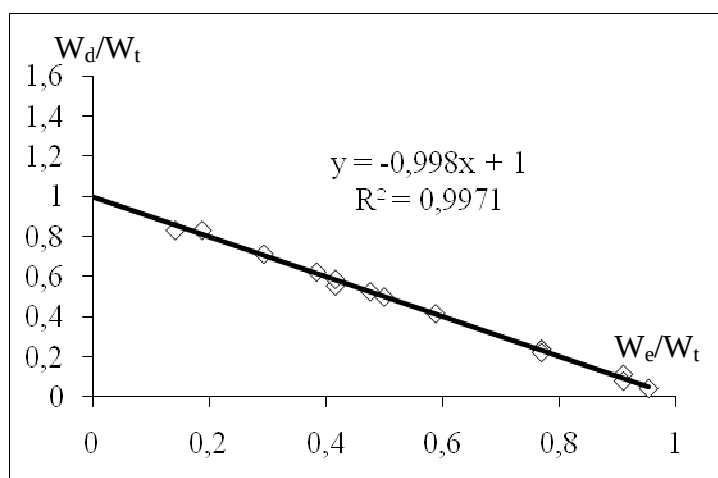
Az előzőekben felsorolt két munka különbsége adja a benyomódás során disszipálódott energiát:

$$W_d = W_t - W_e$$

Átrendezés után felírható a következő összefüggés:

$$\frac{W_d}{W_t} + \frac{W_e}{W_t} = 1$$

Ennek az összefüggésnek az érvényessége kísérleteim során is jól megfigyelhető volt:



2.13 ábra: Összefüggés a disszipálódott és a rugalmas energia között

3. Saját vizsgálatok

3.1. Vizsgálati módszerek

3.1.1 Brinell keménységmérés

A vizsgálatok a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Építőmérnöki Kar, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék laborjában zajlottak. A vizsgálatok során többfajta anyagon végeztem keménységmérést.

Minden vizsgálat azonos körülmények között, ugyanannak az eszköznek a használatával történt.

Például a beton próbatestek esetén a kocka négy felületén végeztem a vizsgálatokat, amelyek a zsaluzatban függőlegesen helyezkedtek el. A méréseket különböző nagyságú terhelési lépcsőkben végeztem el. A maximális terhelőerő a próbatestek felületén 30 másodpercig működött. A kísérleteket $D = 10$ mm gömb alakú edzett acél szűrőszerszámmal végeztem el.

3.1.2 Mélységérzékeny benyomódás vizsgálat

A DSI vizsgálatokat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Gépészmérnöki kar, Polimertechnika Tanszék laborjában végeztem el. A vizsgálatához használt eszköz egy Zwick Z050 számítógéppel vezérelt univerzális szakítógépet volt. A gép kapacitása 50 kN, a vizsgálati sebessége változtatható 0,0001-500 mm/perc között. Az eszköz a vizsgálat során közvetlenül valós időben jelenítette meg az adatokat erő (N) – elmozdulás (mm) koordináta rendszerben. Az általam választott terhelési sebesség 1,0 mm/perc volt. Minden erőszinten legalább három mérést végeztem az esetleges mérési hibák kiküszöbölése érdekében.

A vizsgálat menete:

- a mintákat megfelelő előkészítés után behelyeztem a vizsgáló eszközbe,
- a számítógépes vezérlőfelület segítségével ráadtam a terhelést a mintadarabra,
- a program lefutása után a mintadarabon kapott eredményt ellenőriztem,
- majd az előző mérési helytől megfelelő távolságban elhelyeztem a mintát a vizsgálófej alatt és a vizsgálatot megismételtem.

A vizsgálat elvégzését Hatala Márk, a Polimertechnika Tanszék munkatársa irányította.

3.1.3 Porozitás mérés

Porozitás: Egységnyi térfogatú, kiszáritott anyagban a pórusok térfogatos részaránya. A teljesen tömör anyag porozitása nulla, míg a porózus anyagoké megközelítheti az egyet. Az anyagban lévő pórusok lehetnek nyitottak vagy zártak. Az anyag porozitásától, valamint a pórusok nyitott illetve zárt voltától lényegesen függnek egyéb tulajdonságai (testsűrűség, szilárdság, fagyállóság stb.).

A mintadarabok porozitásának meghatározásához piknométerrel sűrűséget mértem.

Fontos megjegyezni, hogy a vizsgálat során nagyon ügyelni kell, hogy a minta anyaga ne tapadjon le a piknométer aljára vagy falára. Minden anyaghoz legalább két vizsgálatot végeztem, hogy az anyag tényleges tulajdonságait jobban tükröző eredményt kapjak.

A vizsgálat menete:

- a vizsgálandó anyagokat kerámia mozsárban megfelelő méretűre aprítottam (a 0,2 mm lyukbőségű szitán is át kell esnie az aprított anyagnak),
- a már porított anyag tömegét a piknométerrel együtt (anyag+piknométer) lemértem egy erre a célra alkalmas precíz mérlegen (a használt Sartorius Basic mérleg négy tizedesre pontosan mutatja az értékeket grammban),
- ezután a piknométert folyadékkal töltöttem meg, a piknométer oldalán feltüntetett jelig, majd így is megmértem a tömegét (anyag+piknométer+folyadék). A használt folyadék anyagonként változott, a legtöbb anyag esetében desztillált vizet használtam, de a betonok esetén szén-tetraklorid volt az immerziós folyadék,
- a pontos mérés elvégzéséhez meghatározott ideig hagyni kell az anyagokat ülepedni a piknométerben,
- majd az adatok feljegyzése után kiöntöttem a piknométerből a mintát, és lemértem a piknométer tömegét csak a vizsgáló folyadékkal feltöltve,
- ezután a kapott adatokból, a megfelelő képletek alkalmazásával számítható volt az anyagok porozitása.

3.1 táblázat: Anyagsűrűség vizsgálati eredmények

Anyag megnevezése	Sűrűség (ρ)[kg/m ³]
A jelű durva mészkő	2640
B jelű durva mészkő	2725
Tömött mészkő	2690
Riolittufa	2385
Klinkertégla	2745
Burkolótégla	2645
Silka mészhomoktégla	2575
Ytong pórusbeton	2535
Nagyszilárdságú beton	2645
0,65 víz-cement tényezőjű beton	2645
Polimerbeton	2254
Klinker burkolólap	2531



3.1 ábra: Piknométeres mérés

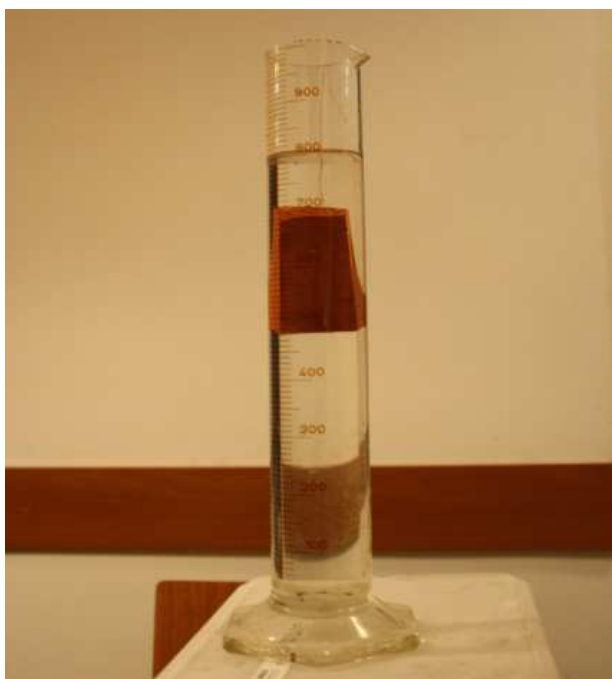
Az anyagok térfogatának meghatározása:

E vizsgálatot a korábbi tanulmányaim során elsajátított módon végeztem, folyadék kiszorításos elven.

A mérés során a mérőedényt vízszintes helyzetbe kell állítani, és meg kell tölteni folyadékkal az előre jelölt szintig. A vízzel telített porózus próbatestet óvatosan a folyadékba kell meríteni, aminek hatására a víz szintje megemelkedik és ennek az emelkedésnek a térfogata adja a test térfogatát.

3.2 táblázat: Testsűrűség és porozitás mérési eredmények

Anyag megnevezése	Testsűrűség (ρ_t)[kg/m ³]	Porozitás [%]
A jelű durva mészkő	1808	31,52
B jelű durva mészkő	1645	39,61
Tömött mészkő	2502	6,99
Riolittufa	1615	32,27
Klinkertégla	2370	13,65
Burkolótégla	1711	35,30
Silka mészhomoktégla	1711	33,54
Ytong pórusbeton	516	79,66
Nagyszilárdságú beton	2414	8,72
0,65 víz-cement tényezőjű beton	2258	14,65
Polimerbeton	2097	6,96
Klinker burkolólap	2254	10,96



3.2 ábra: Testsűrűség mérése

3.1.4 Nyomószilárdság mérés

A keménységi mérőszámokkal való összehasonlításhoz, minden anyagnak megvizsgáltam a nyomószilárdságát. A vizsgálat a korábbiakhoz hasonlóan a BME Építőanyagok Tanszékének laborjában zajlott egy akkreditált vizsgálóeszköz segítségével.

A nyomószilárdság meghatározásához az alábbi eszközöket használtam:

- Alpha 3-3000 S gyártmányú 3000 kN-os hidraulikus törőgép,
- tolómérő; 0,1 mm pontosságú,
- digitális mérleg; 0,01 kg pontosságú.

Az anyagok nyomószilárdsága több tényező függvénye.

Függ:

- a minta alakjától,
- a minta méretétől,
- a terhelőlapok állapotától,
- a minta pórusvízzel telítettségétől.

A mérés előtt a próbatesteket szárítógépben kiszáritottam, hogy elveszítsék a kémiai kötésben nem lévő víztartalmukat.

A vizsgálathoz anyagonként azonos méretű és alakú próbatesteket készítettem, ezeket azonos terhelési sebességgel törésig terheltem, majd a maximális erőt feljegyeztem.



3.3 ábra: Nyomószilárdság mérése betonon

3.1.5 Rugalmassági modulus vizsgálata

A rugalmassági modulust anyag típusonként 2 db 120×120×360 mm névleges méretű próbatesten mértem. A vizsgálat során a hasábokat fokozatosan növekvő nagyságú erővel terheltem ciklikusan a nyomószilárdság 30%-ának megfelelő feszültség szintig, miközben mértem az alakváltozásokat. A mérést mérőerősítő segítségével számítógépen rögzítettem a későbbi kiértékeléshez. A terhelő erők meghatározásának alapja a nyomószilárdság vizsgálati egyedi értékek átlaga volt ($f_{cm, cube, test}$). Ennek értékét felhasználva számítottam a terhelő erőket, figyelembe

véve a 150 mm élhosszúságú kocka alakú próbatesten mért nyomószilárdság $120 \times 120 \times 360$ mm méretű hasáb alakú próbatestre való átszámítását: $\sigma_{c,max} = 0,85 \cdot f_{c,cube} \cdot 0,3$.

A rugalmassági modulus számítását az $E_c = \Delta\sigma_c / \Delta\varepsilon_c$ összefüggéssel végeztem.

3.1.6 Keménységmérés rugalmas visszapattanás elvén

A felsorolt vizsgálatokon kívül végeztem még a mintadarabokon keménységmérést rugalmas visszapattanás elvén működő készülékekkel is, Schmidt-kalapáccsal és Leeb-készülékkel. Ezek eredményei és megállapításai a jövőbeni kutatásaim részét képezik.

3.2. Vizsgált anyagok

Fémek:

- Alumínium
- Lágycél
- Betonacél

Kerámiák:

- Klinker burkolólap
- Klinkertégla
- Burkolótégla

Kőzetek:

- Kétféle durva mészkő
- Tömött mészkő
- Riolittufa

Egyéb kőszzerű anyagok:

- Silka mészhomoktégla
- Ytong pórusbeton

Betonok:

- Nagyszilárdságú beton (HSC)
- Normál szilárdságú, 0,65 víz-cement tényezőjű beton
- Polimerbeton



3.4 ábra: A vizsgált anyagok

3.3. Vizsgálati eredmények

3.3.1 Bevezetés

Az eredmények értékelésének első lépéseként az anyagokat felosztottam négy csoportba mechanikai viselkedésük szerint:

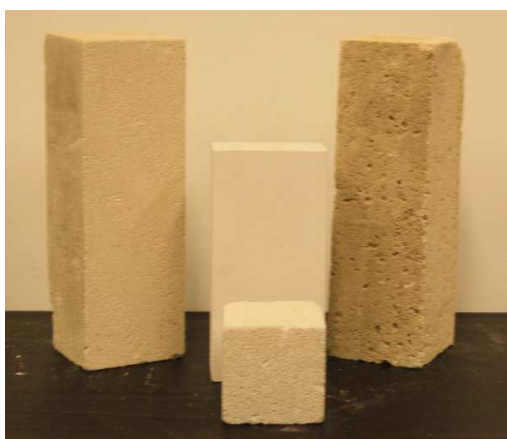
- Rugalmas anyagok (3.5 ábra)
 - Klinker burkolólap
 - Klinkertégla
- Rugalmas-képlékeny anyagok (3.6 ábra)
 - Tömött mészkő
 - Nagyszilárdságú beton (HSC)
 - Polimerbeton
 - Normál szilárdságú, 0,65 víz-cement tényezőjű beton
 - Riolitufa
 - Burkolótégla
- Képlékeny anyagok (3.7 ábra)
 - Silka mészhomoktégla
 - Durva mészkő A
 - Durva mészkő B
 - Ytong pórusbeton
- Fémek (3.8 ábra)
 - Betonacél
 - Lágyacél
 - Alumínium



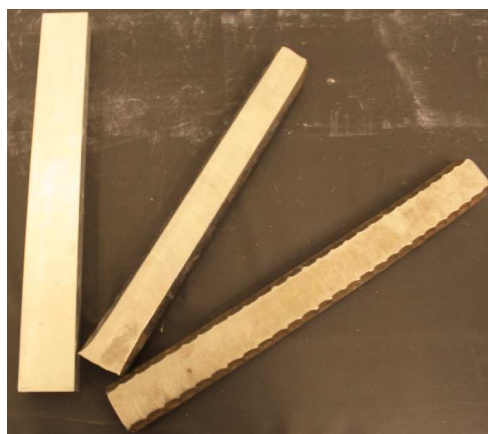
3.5 ábra: Az általam vizsgált rugalmas anyagok



3.6 ábra: Az általam vizsgált rugalmas-képlékeny anyagok

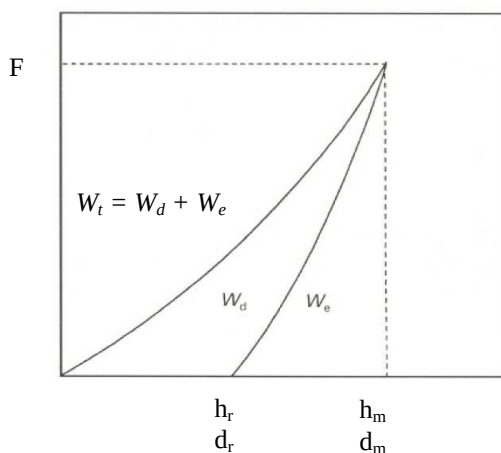


3.7 ábra: Az általam vizsgált képlékeny anyagok



3.8 ábra: Az általam vizsgált fémek

A csoportok meghatározása után következő lépésként az egyes csoportok különböző anyagtulajdonságait hasonlítottam össze. A következő oldalakon a vizsgálati eredményeim összefoglalását adom meg egyes anyagcsoportokon belül minden vizsgált anyagra külön-külön. A diagramokon és táblázatokban megjelenő jelölések értelmezése a 3.9 ábrán látható. A diagramokon megjelenő fekete színű adatpontok a DSI vizsgálatokból, míg a sárga színű adatpontok a Brinell vizsgálatokból származó adatokat mutatják.



3.9 ábra: Benyomódási mélység és átmérő valamint a terhelőerő közötti összefüggés (elvi ábra)

A következő kifejezések a d (maradó benyomódás átmérő) és a h (maradó benyomódási mélység) értéke közötti összefüggést írják le:

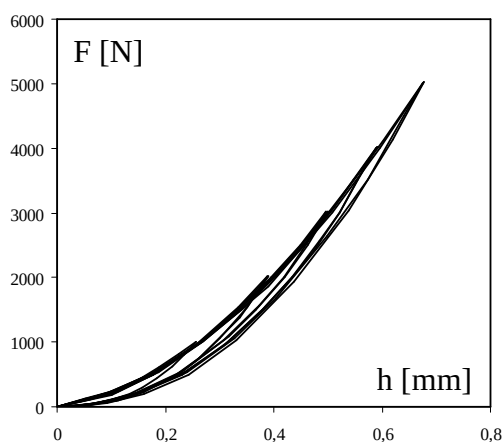
$$h = 0,5 \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)$$

$$d = \sqrt{D^2 - (D - 2h)^2}$$

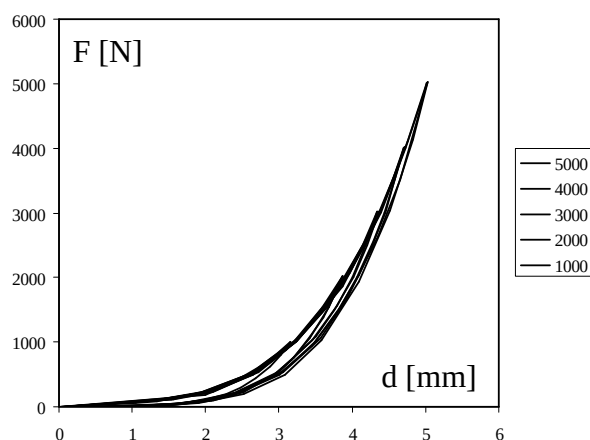
A 3.3.2 fejezetben a 3.3.1 fejezetben felsorolt anyagok vizsgálati eredményeit ábrázolom táblázatos és grafikus formában.

3.3.2 Összefoglaló adatok

Rugalmas anyagok: 1. Klinker burkolólap



3.10 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés



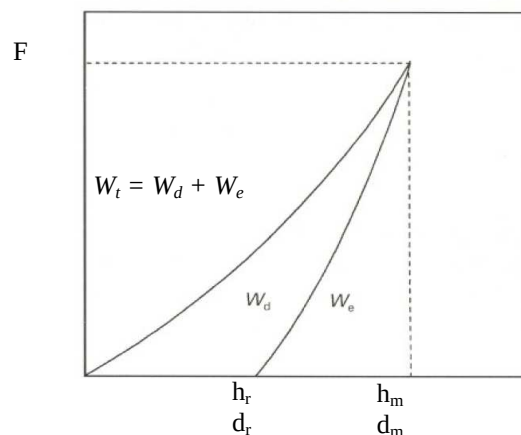
3.11 ábra: Benyomódási átmérő (d) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

3.3 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

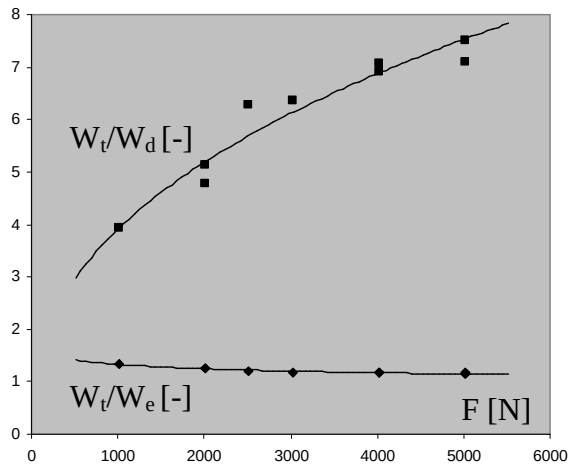
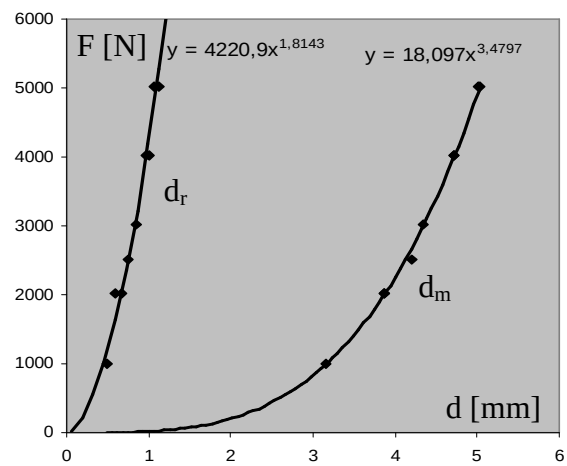
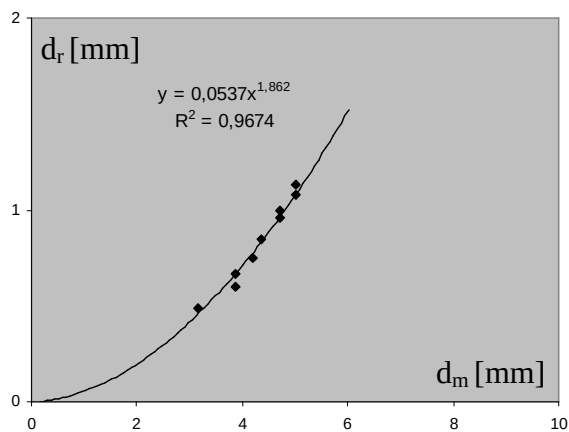
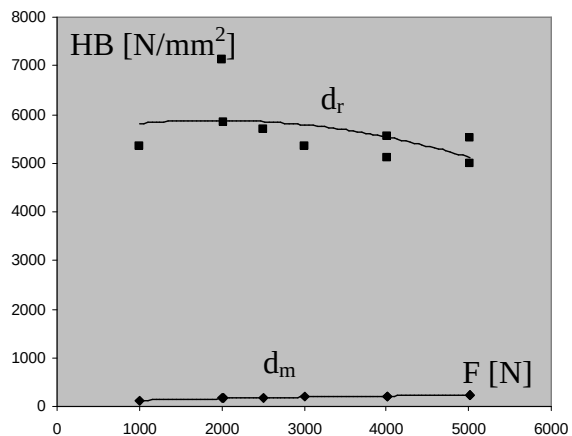
F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
1008,1	0,256	0,006	100,4	74,8	25,6	3,158774	0,489751
2012,2	0,39	0,009	286,7	230,7	56	3,871899	0,59973
2015,3	0,389	0,011	286,6	226,4	60,1	3,867133	0,66296
2504,5	0,463	0,014	559,5	470,5	89,1	4,202681	0,747807
3016,8	0,497	0,018	551,4	464,6	86,7	4,346489	0,847764
4014,9	0,589	0,023	860,1	735,7	124,4	4,708749	0,958063
4019,4	0,591	0,025	863,4	741,3	122,1	4,716235	0,998749
5018,2	0,675	0,029	1257,8	1090,4	167,4	5,017719	1,07547
5020,3	0,677	0,032	1244	1068,8	175,1	5,024608	1,129559

A 3.10 és 3.11 ábrák alapján megállapítható, hogy a klinker burkolólap a rugalmas anyagok tulajdonságainak megfelelően viselkedik. A maradó benyomódás értékei közel egy nagyságrenddel kisebbek az elért maximális értékeknél. Az anyagban nagy rugalmas alakváltozások mennek végbe. Mindkét függvény csak rövid lineáris szakasszal rendelkezik, az ezeken a szakaszokon kialakuló alakváltozások lesznek a maradó értékek.

A táblázatból olvasható munka értékek igazolják a fent említetteket, a kismértékű disszipálódott energiához egy nála jóval nagyobb rugalmas energia társul.



3.12 ábra: Értelmezést segítő ábra

3.13 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében3.14 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata3.15 ábra: Maximális (d_m) és maradó (d_r) benyomódási átmérő kapcsolata3.16 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

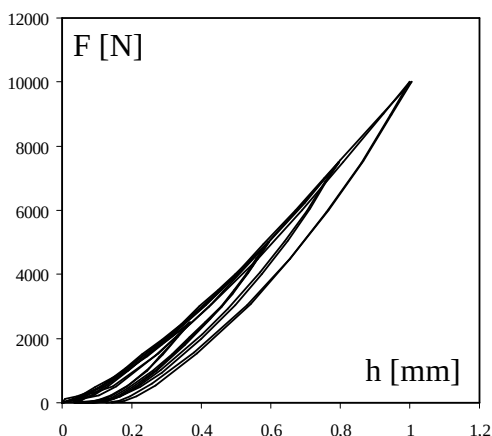
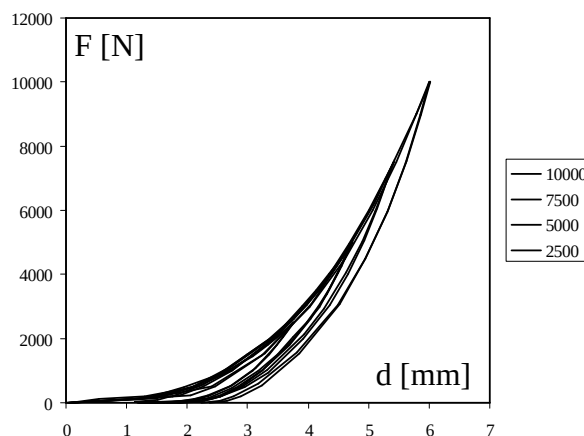
A 3.13 ábrán látható a W_t/W_d a teljes energia a disszipálódott energia arányában és a W_t/W_e a teljes energia a rugalmas energia arányában. A klinker rugalmas tulajdonságaiból következik, hogy a W_t/W_e érték közel 1, de disszipálódott munka a teher növekedésével csökken.

A 3.14 ábra a terhelő erőt (F) ábrázolja a maradó és a maximális benyomódás átmérőjének függvényében. Erről az ábráról is jól leolvashatóak a kerámia rugalmas tulajdonságai, ami a maradó értékek és a maximális értékek közötti különbségben nyilvánul meg.

A 3.15 ábra a maradó benyomódási átmérőt ábrázolja a maximális benyomódási átmérő függvényében. Rugalmas anyagoknál az ábra alakja jellemzően egy hatványfüggvénnyel írható le.

A 3.16 ábra a Brinell-keménységet (HB) ábrázolja a terhelő erőt (F) függvényében, mind a maradó, mind a maximális benyomódási átmérővel számolva. Az ábra jól mutatja, hogy a számítható Brinell-keménység értéke mennyire függ attól, hogy tehermentesítés után vagy erő alatt mért alakváltozással számolunk. Rugalmas anyagoknál ez az utóbbi érték különösen magas.

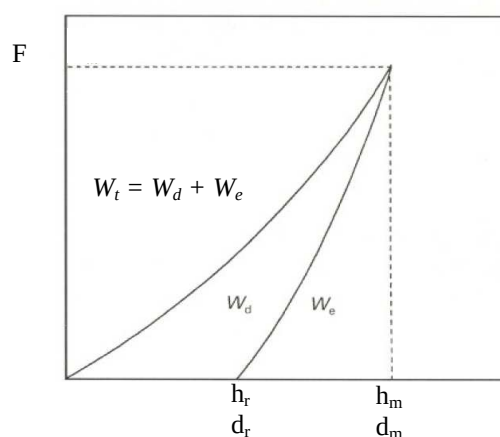
A fent említett tulajdonságok szerint ábrázoltam a függvényeket a többi anyagnál is.

Rugalmas anyagok: 2. Klinkertégla3.17 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés3.18 ábra: Benyomódási átmérő (d) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

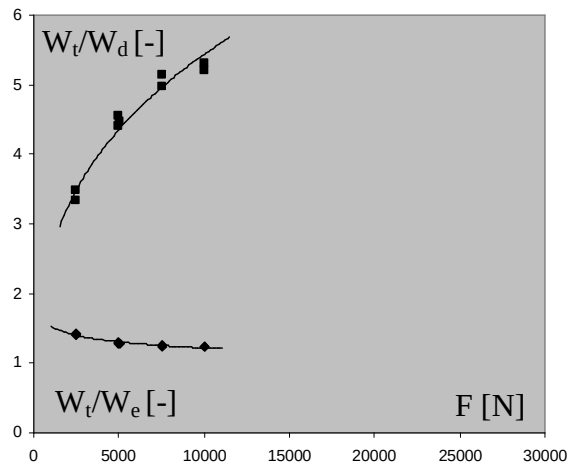
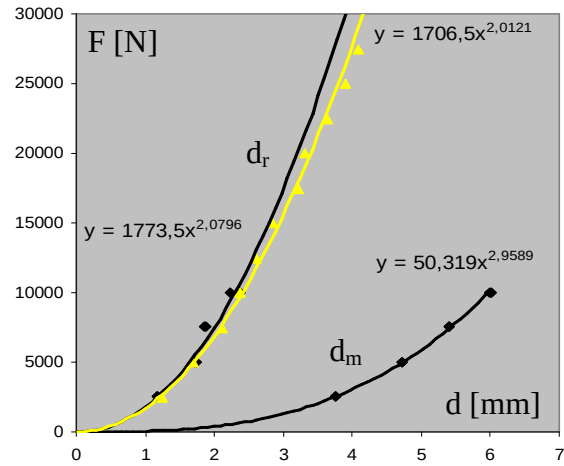
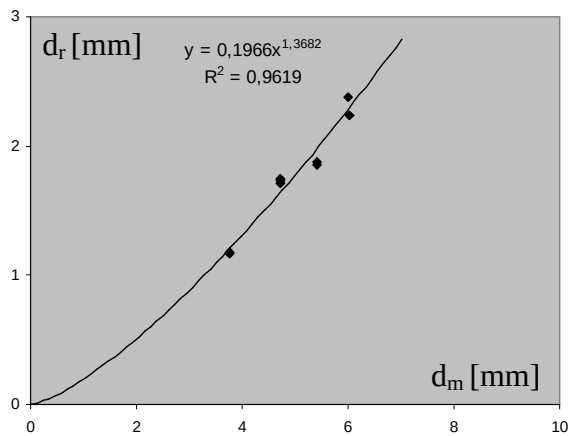
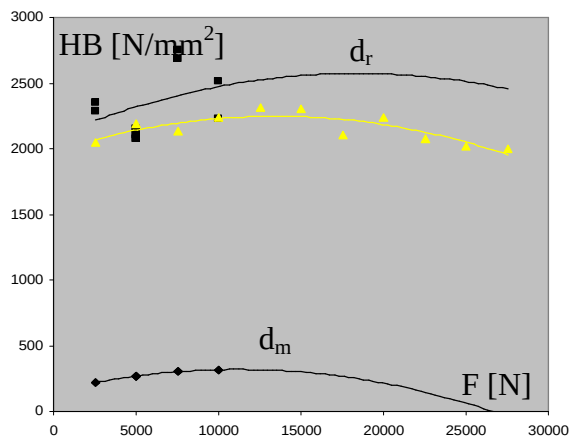
3.4 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
2514,8	0,365	0,034	389,7	278,1	111,6	3,750613	1,164206
2512,2	0,368	0,035	402,7	281,8	120,9	3,765409	1,181144
5013,2	0,595	0,074	1247,4	974,1	273,4	4,731163	1,714088
5014,2	0,595	0,076	1278	987,3	290,7	4,731163	1,736921
5017,4	0,593	0,077	1292,5	1002,6	289,9	4,723707	1,748223
7518,9	0,794	0,089	2553,9	2056,9	496,9	5,407241	1,878381
7517,9	0,796	0,087	2524,8	2017,1	507,7	5,413459	1,857343
10015	1	0,143	4163,7	3378,2	785,5	6	2,37449
10013,8	1,006	0,127	4283,4	3451,5	822	6,015967	2,239528

A klinkertégla e diagramjai a klinker burkolólaphoz hasonló módon alakulnak. A 3.17 és 3.18 ábrán látható, hogy a klinkertéglán nagyobb képlékeny alakváltozások mennek végbe, ezáltal nagyobb maradó alakváltozás keletkezik.



3.19 ábra: Értelmezést segítő ábra

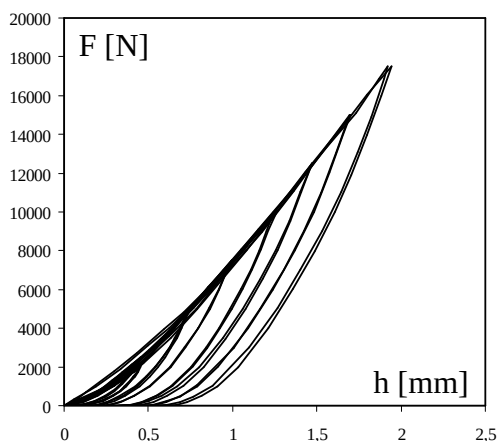
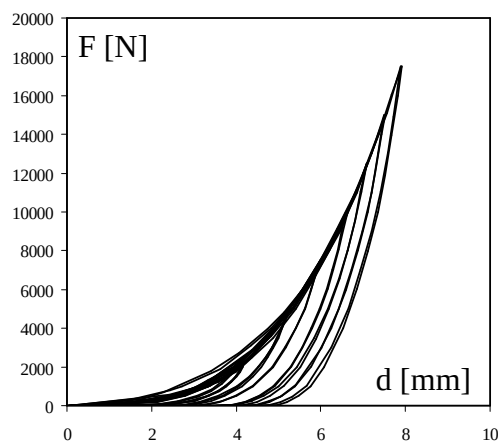
3.20 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében3.21 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata3.22 ábra: Maximális (d_m) és maradó (d_r) benyomódási átmérő kapcsolata3.23 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

Jelen ábrák a klinker burkolólaphoz hasonlóan alakulnak, jobban megfigyelhető képlékeny tulajdonságokkal.

A 3.21 és a 3.23 ábrán sárga színnel a Brinell-vizsgálatból számított eredmények vannak feltüntetve, míg fekete színnel a mélységérzékeny benyomódás vizsgálat eredményei láthatóak (ez a további diagramokra is vonatkozik).

A 3.21 ábrán megfigyelhető, hogy mind a Brinell-vizsgálatból, mind a DSI vizsgálatból adódó maradó benyomódás átmérő-erő függvény másodfokú. Ez a Meyer-törvényben azt jelenti, hogy a kitevő értéke $n=2$.

A 3.22 ábrán megfigyelhető, hogy a grafikon alakja a görbétől az egyenes felé változik (klinker burkolólaphoz képest).

Rugalmas-képlékeny anyagok: 1. Tömött mészkő3.24 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés3.25 ábra: Benyomódási átmérő (d) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

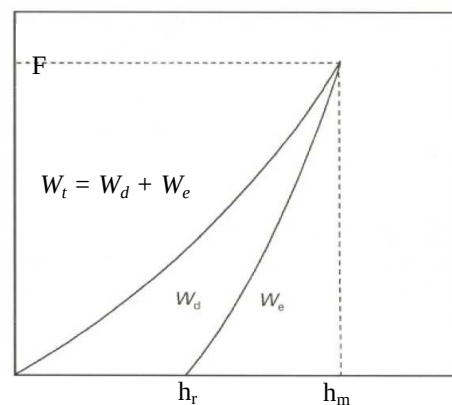
3.5 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
2008,2	0,455	0,037	385,1	221,9	163,2	4,167961	1,2143
2010,1	0,448	0,036	383,3	225,3	158	4,137292	1,197838
2008,1	0,448	0,042	386	218,9	167,1	4,137292	1,293423
2507,1	0,453	0,036	470,5	313,6	156,9	4,159226	1,197838
2506,6	0,457	0,045	479,6	307,2	172,4	4,176674	1,338619
5013,4	0,75	0,154	1434,8	981	453,8	5,267827	2,46275
5014,1	0,742	0,157	1371,4	936,8	434,6	5,241922	2,486243
5004,4	0,745	0,115	1405,9	888	518	5,251657	2,132393
7513,4	0,995	0,232	3047,9	1922,5	1125,4	5,986643	3,010765
7510,1	0,996	0,227	3100,4	1903,7	1196,6	5,989318	2,978907
10004	1,245	0,291	5387,7	2976,7	2411	6,603022	3,361737
10012,3	1,259	0,325	5615,8	3023,6	2592,2	6,634733	3,546477
12514,3	1,469	0,305	7553	4628,6	2924,4	7,080124	3,439171
12510,1	1,473	0,344	7404	4484,2	2919,9	7,088095	3,645087
15016,7	1,694	0,445	10684,6	6202,7	4481,9	7,502097	4,124064
15018,9	1,699	0,472	10848,8	6203,2	4645,6	7,510898	4,241328
17507,8	1,921	0,432	14445	8133,9	6311,1	7,879025	4,066141
17516,1	1,941	0,519	14718,1	8076,3	6641,8	7,910125	4,436503

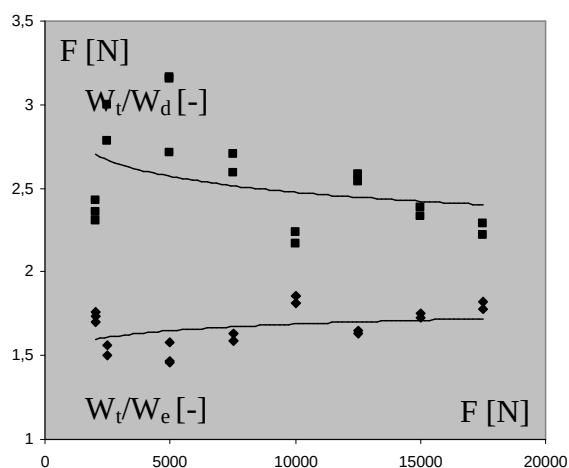
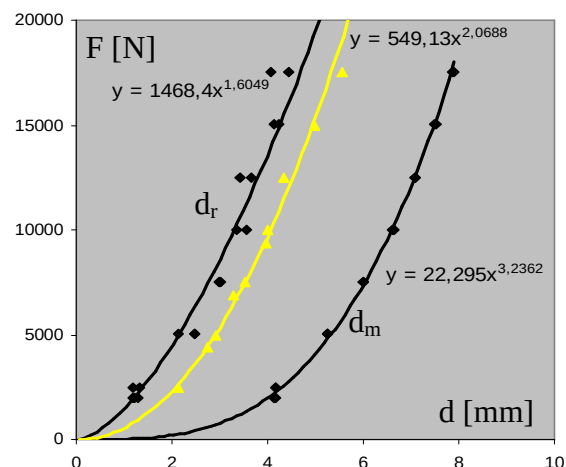
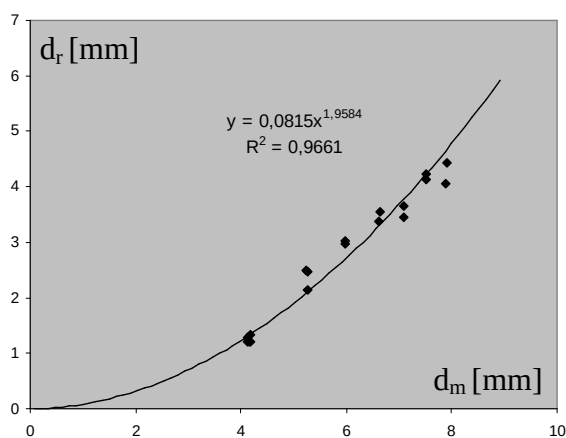
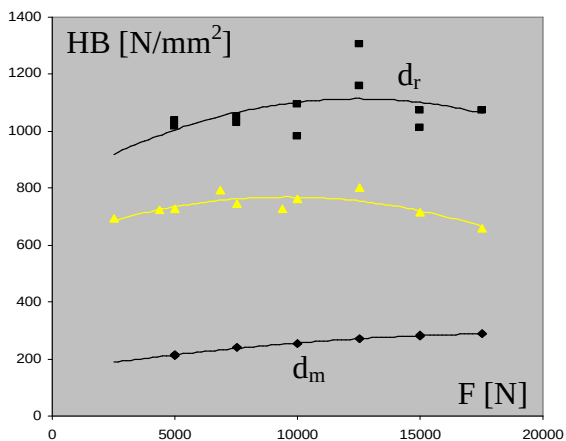
A rugalmas-képlékeny anyagok viselkedéséből adódik, hogy a disszipálódott energia és a rugalmas energia is jelentős részét adja a teljes energiának.

A tömött mészkőnél már azonos nagyságrendűek a maradó és a maximális benyomódási átmérők.

A 3.24 ábrán már megfigyelhető egy jelentősebb lineáris szakasz a terhelés vonalán, amely képlékeny alakváltozásokra utal.

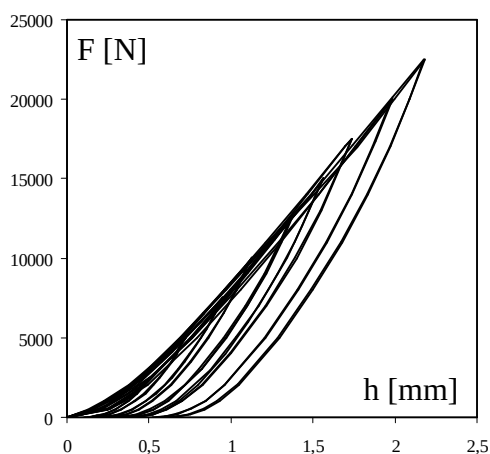
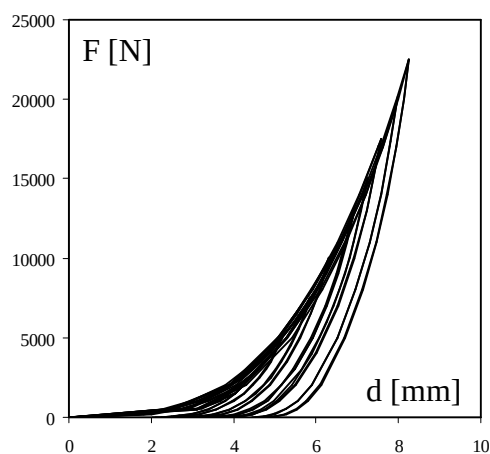


3.26 ábra: Értelmezést segítő ábra

3.27 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében3.28 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata3.29 ábra: Maximális (d_m) és maradó (d_r) benyomódási átmérő kapcsolata3.30 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

A 3.27 ábráról leolvasható, hogy az energia arányok 2-höz tartanak. Ebben az esetben éppen a teljes energia egyik fele a rugalmas, a másik fele a disszipálódott energiából származik.

A 3.30 ábrán megfigyelhető, a 2.6 fejezetben már említett jelenség amely szerint a maximális HB értékhez egy adott erőérték tartozik. Ez a jelenség majdnem az összes vizsgált porózus anyagnál kimutatható volt.

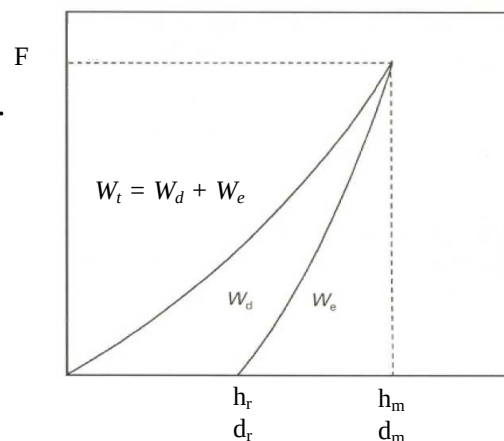
Rugalmas-képlékeny anyagok: 2. Nagyszilárdságú beton (HSC)3.31 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés3.32 ábra: Lenyomatátmérő (d) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

3.6 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

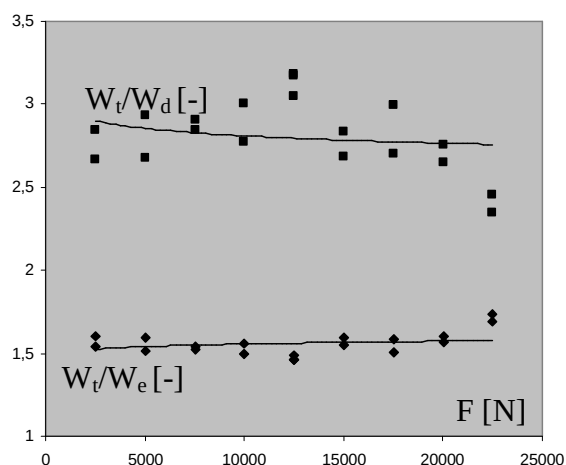
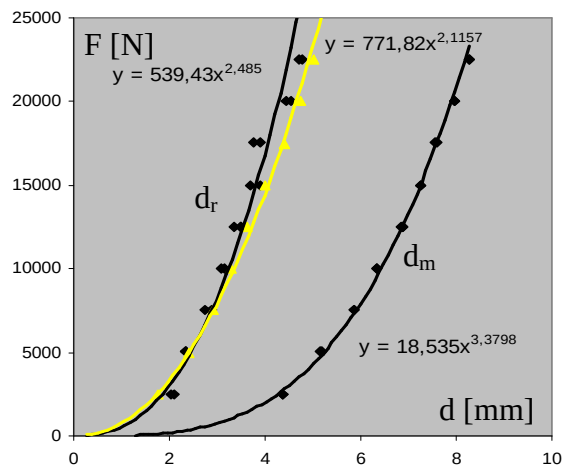
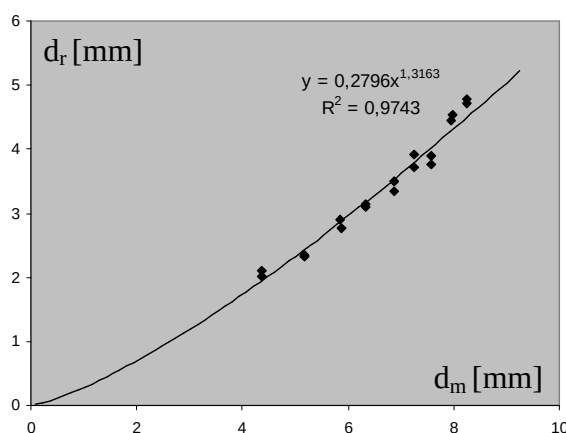
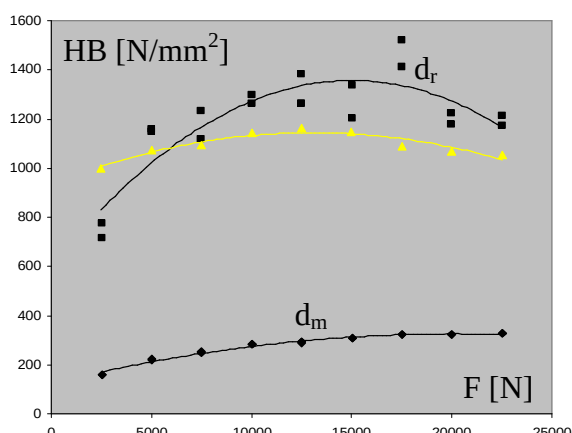
F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
2510,7	0,501	0,112	475,1	307,9	167,2	4,363026	2,104715
2509,3	0,501	0,103	485,5	303,5	181,9	4,363026	2,019298
5010,5	0,718	0,139	1407,6	927,6	479,9	5,163129	2,34152
5011,8	0,722	0,138	1456,6	912,2	544,4	5,176376	2,3332
7515,7	0,947	0,214	2853	1851,1	1001,9	5,856002	2,894273
7513	0,955	0,194	2858,2	1874,8	983,4	5,878086	2,758524
10012,5	1,126	0,246	4537,3	3028,2	1509,1	6,322064	3,098054
10012,6	1,129	0,253	4698,6	3006,4	1692,2	6,32941	3,140695
12521,3	1,368	0,316	6558,6	4493,2	2065,4	6,872722	3,498653
12515,7	1,373	0,316	6720	4514,1	2205,9	6,883276	3,498653
12514,4	1,363	0,288	6626,4	4544,2	2082,2	6,862137	3,34488
15015	1,562	0,398	9735,1	6105,4	3629,8	7,260897	3,909781
15016,1	1,563	0,357	9604,2	6214,8	3389,4	7,26279	3,710823
17516,1	1,733	0,395	12305,4	8198,2	4107,2	7,570128	3,895626
17513,5	1,737	0,367	12945,5	8149,7	4795,9	7,577026	3,760485
20015,3	1,976	0,521	15909,7	10131,1	5770,5	7,963774	4,444574
20018,7	1,984	0,542	16328,1	10170,4	6157,7	7,9759	4,528239
22516,4	2,18	0,591	21197,1	12545,5	8651,6	8,257748	4,716235
22509,3	2,178	0,61	21488	12349,1	9138,9	8,255014	4,786606

A nagyszilárdságú betonra a tömött mészkőnél említettek érvényesek.

Itt még jobban kimutatható a képlékeny viselkedés megjelenése.



3.33 ábra: Értelmezést segítő ábra

3.34 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében3.35 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata3.36 ábra: Maximális (d_m) és maradó (d_r) benyomódási átmérő kapcsolata3.37 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

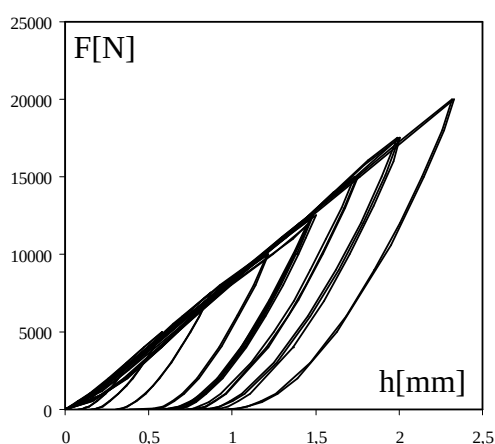
A 3.34 ábrán a tömött mészkőnél említett tulajdonság figyelhető meg.

A 3.35 ábrán klinkertéglánál említett viselkedés látható itt is.

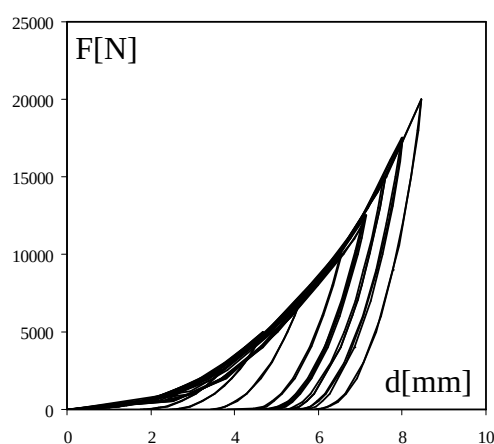
A 3.36 ábrán megfigyelhető, hogy a benyomódási átmérők kapcsolata a kezdeti görbe szakasz után lineárisnak tekinthető.

A 3.37 ábrán a tömött mészkőnél tett állítás figyelhető meg.

Rugalmas-képlékeny anyagok: 3. Polimerbeton



3.38 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés



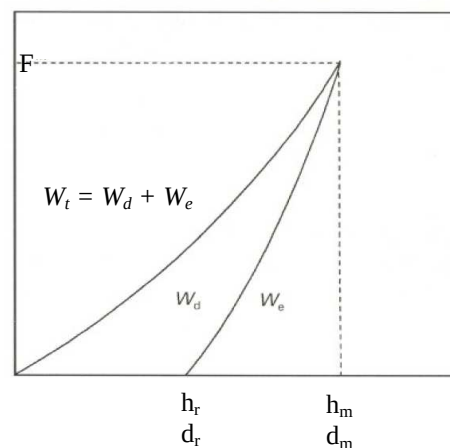
3.39 ábra: Benyomódási átmérő (d) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

3.7 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

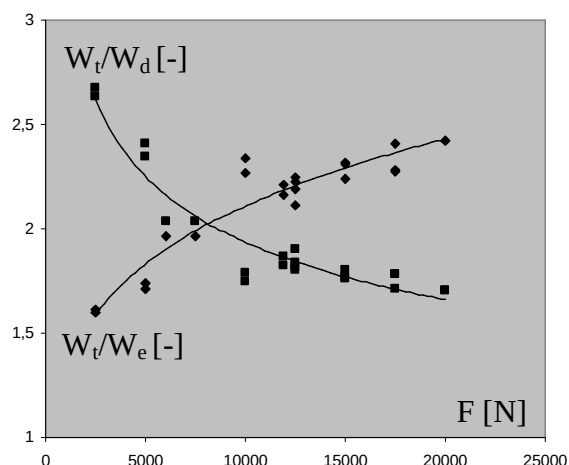
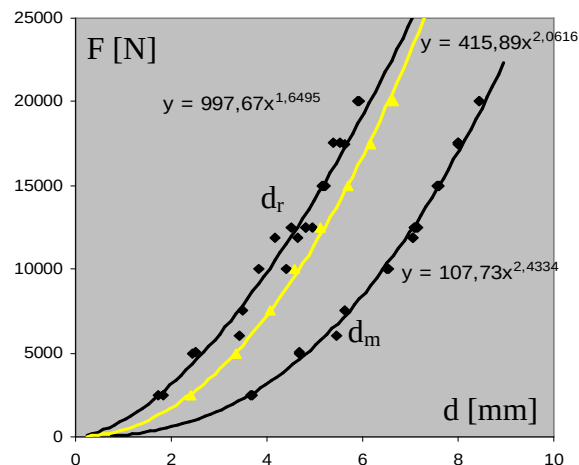
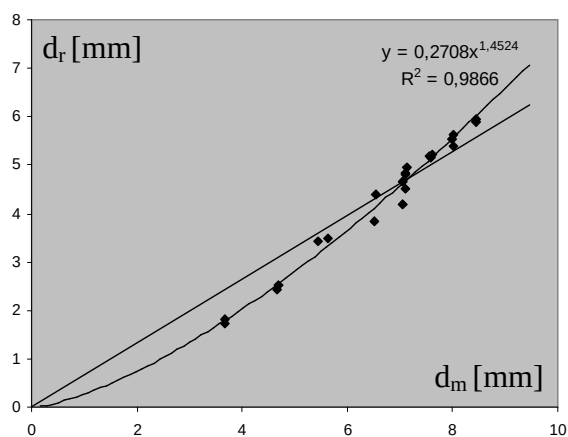
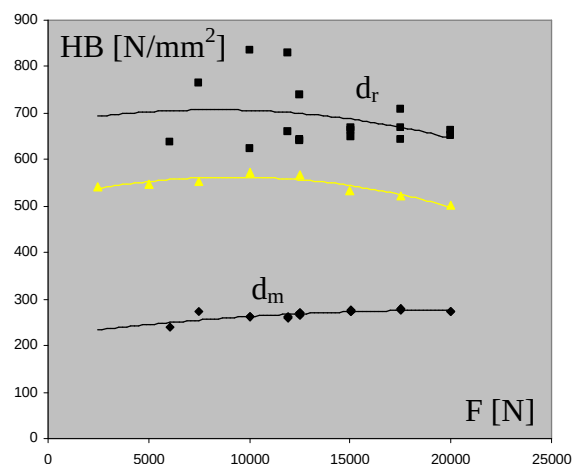
F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
2511,2	0,351	0,084	397,8	246,6	151,1	3,680652	1,825315
2512,2	0,349	0,076	395,9	248	147,9	3,670531	1,736921
5008	0,58	0,151	1348,7	788,4	560,3	4,674869	2,439015
5010,9	0,581	0,16	1376,1	789,8	586,4	4,678649	2,509502
7509,6	0,872	0,313	3091,6	1572,7	1518,8	5,642558	3,482546
10003,8	1,21	0,381	5886	2592,9	3293,1	6,522546	3,828754
10009,6	1,219	0,511	5947,5	2544	3403,5	6,543406	4,404034
11889,4	1,451	0,457	8029,4	3632,5	4397	7,044033	4,176674
12504,4	1,487	0,621	8632,3	3942,4	4689,9	7,11585	4,826742
12510,7	1,478	0,539	8619,1	3867,4	4751,7	7,098032	4,516405
12505,2	1,5	0,658	8859,9	3942,8	4917,1	7,141428	4,958643
15008,4	1,753	0,736	12838,6	5539	7299,6	7,60447	5,222376
15009,9	1,747	0,715	12775	5534	7241,1	7,594206	5,153164
15011	1,73	0,721	12530,9	5588,5	6942,5	7,564945	5,173068
17509	2,003	0,786	16860,6	7388,5	9472,1	8,004496	5,382269
17511,8	1,99	0,834	16920,7	7441,9	9478,9	7,984961	5,529718
20005,1	2,33	0,979	22564,2	9313,4	13250,7	8,454845	5,943588
20009,2	2,32	0,96	22593,4	9321,8	13271,6	8,44218	5,891825

A benyomódás átmérő és a teher közötti kapcsolatot leíró függvényről leolvasható, hogy ahogy haladunk az egyre képlékenyebb anyagok felé, a tehermentesítési görbe egyre jobban közelít egy függőlegest.

A polimerbetonnál a disszipálódott energia nagy terhek esetén már nagyobb, mint a rugalmas energia.

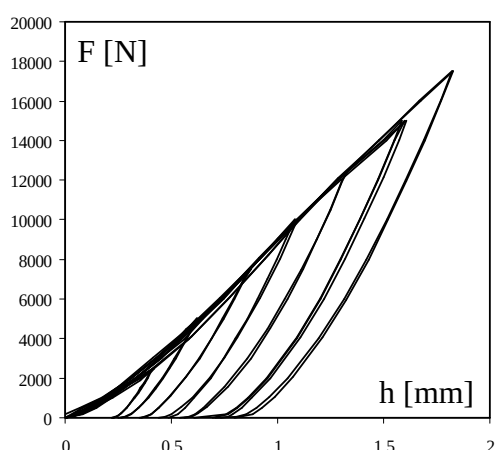
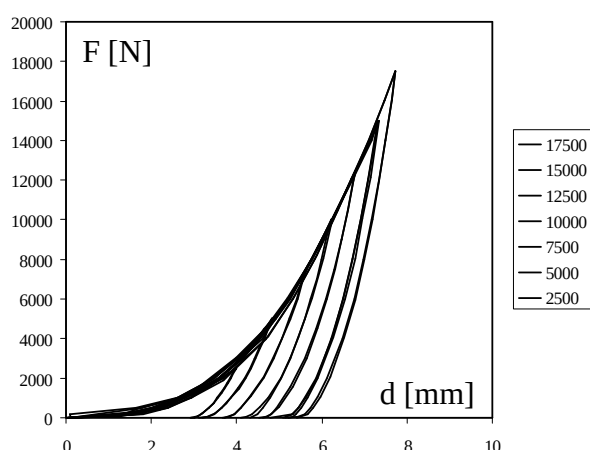


3.40 ábra: Értelmezést segítő ábra

3.41 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében3.42 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata3.43 ábra: Maximális (d_m) és maradó (d_r) benyomódási átmérő kapcsolata3.44 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

A 3.41 ábrán megfigyelhető az előző oldalon említett jelenség, ami szerint a disszipálódott energia bizonyos teherszint fölött nagyobb lesz, mint a rugalmas energia.

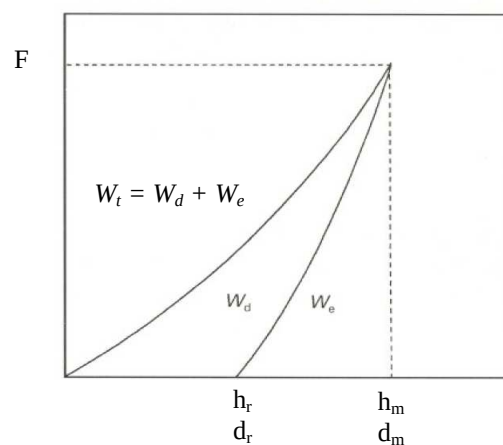
A 3.43. ábra mutatja, hogy a benyomódási átmérők közötti kapcsolat leírható egy lineáris függvénnyel, amelynek a polimerbetonnál már megbízhatóan nagy a korrelációs együtthatója. A 3.43 ábrán egyazon adatsorra kétféle trendvonalat illesztettem.

Rugalmas-képlékeny anyagok: 4. Normál szilárdságú beton (v/c=0,65)3.45 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés3.46 ábra: Benyomódási átmérő (d) és Terhelőerő (F) közötti összefüggés

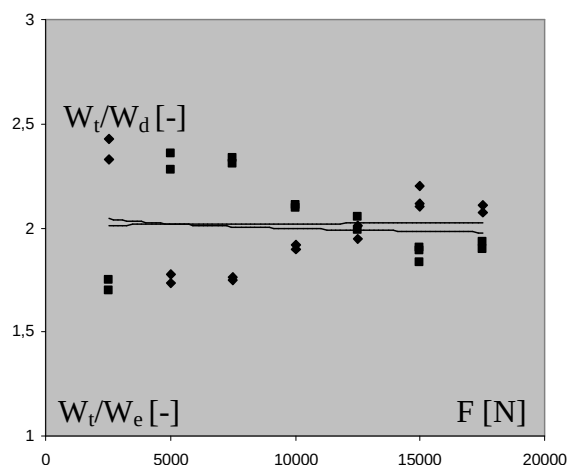
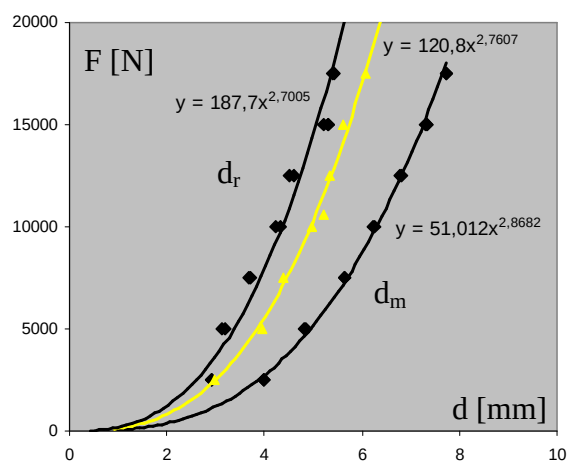
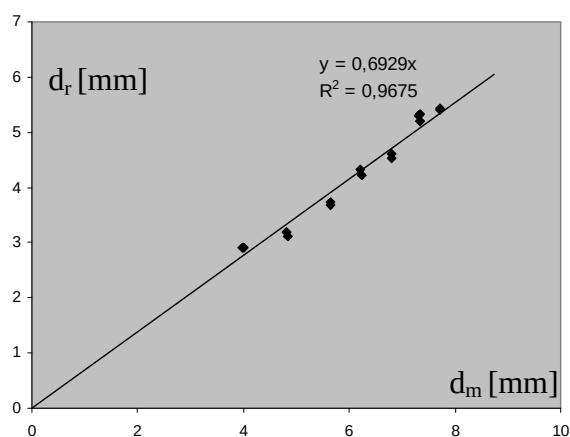
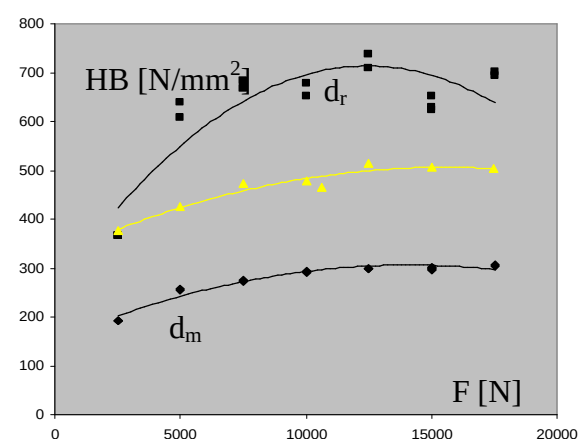
3.8 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
2510,1	0,413	0,218	457,2	196,1	261,1	3,979664	2,9206
2508,6	0,417	0,218	483,4	199,4	284	3,998055	2,9206
5013,2	0,619	0,262	1239,3	712,9	526,3	4,819477	3,194593
5006,7	0,626	0,249	1283,7	720,9	562,8	4,844842	3,116408
7522,1	0,869	0,35	2761,5	1579,7	1181,8	5,633769	3,675595
7519,1	0,874	0,359	2804,9	1590,5	1214,4	5,648407	3,720817
10012,8	1,082	0,489	4628,7	2437,9	2190,8	6,212657	4,313179
10013,5	1,095	0,47	4849,5	2531,6	2317,8	6,24531	4,232777
12512,7	1,331	0,561	7532,4	3746,3	3786,1	6,793656	4,602295
12517,2	1,332	0,54	7513,1	3854,6	3658,5	6,795815	4,520354
15008,9	1,607	0,732	11340,6	5155,6	6184,9	7,34508	5,20929
15010,9	1,588	0,76	10966,2	5172,8	5793,4	7,30979	5,299962
15014,5	1,597	0,766	11082,8	5273,7	5809,1	7,326552	5,319114
17507,4	1,827	0,796	14583,6	6902,9	7680,7	7,728408	5,413459
17517,4	1,823	0,804	14606,4	7046,9	7559,5	7,721832	5,438229

Tulajdonságai hasonlóak a többi vizsgált rugalmas-képlékeny anyag tulajdonságaihoz.

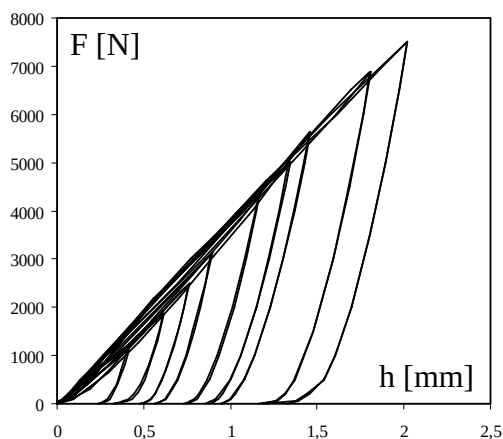
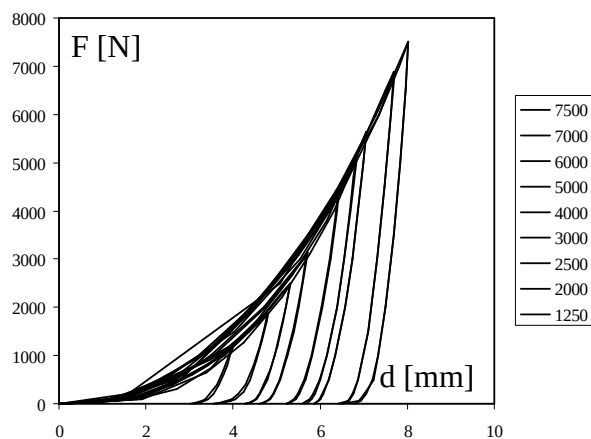


3.47 ábra: Értelmezést segítő ábra

3.48 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében3.49 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata3.50 ábra: Maximális (d_m) maradó (d_r) és benyomódási átmérő kapcsolata3.51 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

A 3.48 ábra alapján megállapítható, hogy a rugalmas és disszipálódott energia azonos érték körül állandósul beton esetében. Ez az ábra analóg a polimerbetonnál láthatóval, azzal a különbséggel, hogy itt a legkisebb és a legnagyobb terhelésre kisebb az eltérés az átlagos értéktől.

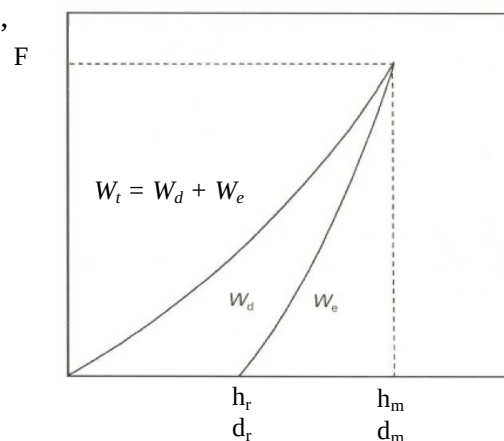
A 3.50 ábra mutatja, hogy a két benyomódási átmérő közötti kapcsolat itt már egyértelműen lineáris összefüggéssel írható le.

Rugalmas-képlékeny anyagok: 5. Rioltiffa3.52 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés3.53 ábra: Benyomódási átmérő (d) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

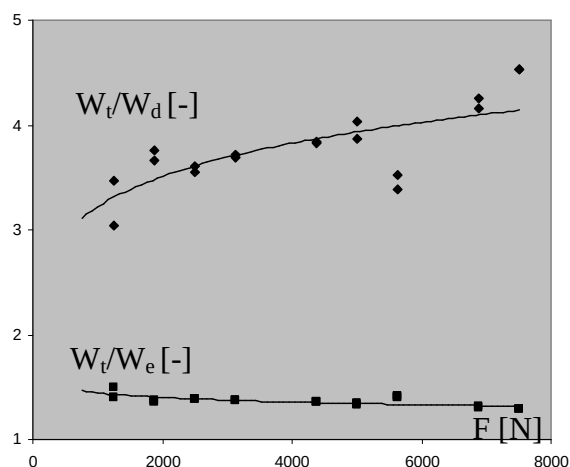
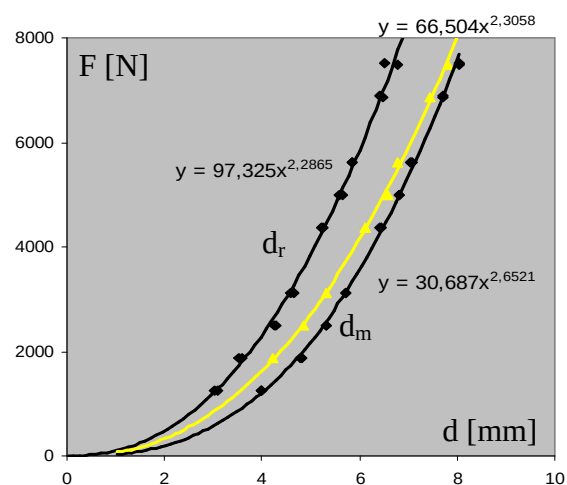
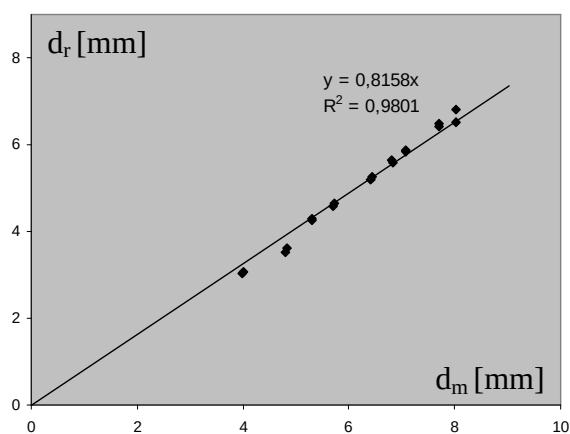
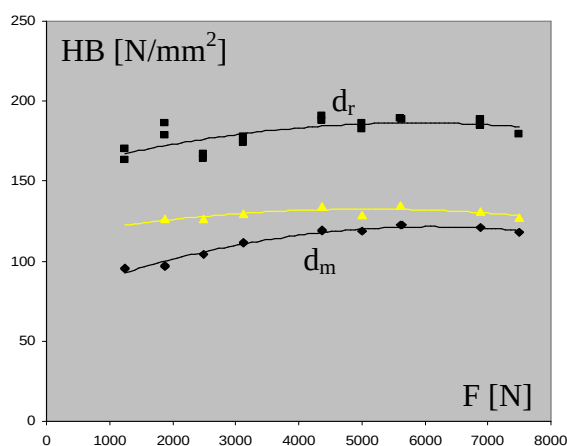
3.9 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
1254,4	0,415	0,235	224	73,8	150,2	3,988872	3,029703
1249	0,418	0,243	225,8	65,1	160,7	4,002637	3,079579
1879	0,618	0,335	567,1	151	416,1	4,815839	3,598764
1875,6	0,613	0,321	575,2	156,8	418,4	4,797596	3,525314
2500,5	0,764	0,485	855	240,5	614,6	5,312741	4,296405
2502,7	0,763	0,476	871,4	241,2	630,2	5,30955	4,258368
3130,8	0,897	0,572	1328,4	359,7	968,7	5,71503	4,644487
3127,8	0,891	0,559	1336,5	359,5	976,9	5,697761	4,59457
4376,8	1,164	0,73	2580,9	674	1906,9	6,41408	5,20273
4379,5	1,171	0,743	2547,3	663,7	1883,6	6,430788	5,24517
5004,2	1,344	0,854	3366,4	871,4	2495	6,821631	5,58952
5000,9	1,337	0,873	3388,6	840,1	2548,5	6,806594	5,645484
5631,2	1,458	0,949	3689,5	1046,7	2642,8	7,058112	5,861535
5627,8	1,46	0,946	3569,1	1054,3	2514,7	7,062124	5,853233
6879,3	1,811	1,187	6001,6	1445,3	4556,3	7,70202	6,468703
6882	1,806	1,161	6118,7	1436,5	4682,2	7,693728	6,406896
7505	2,019	1,205	7632,5	1684,7	5947,8	8,028359	6,510906
7503	2,018	1,331	7611,3	1678,5	5932,8	8,026874	6,793656

A korábbi rugalmas-képlékeny anyagokéhoz hasonló a viselkedés, de a 3.45 függvények lineáris szakaszainak hossza egyre nő a rugalmas szakaszokhoz képest. Ebből következően a tehermentesítési szakasz is egyre nagyobb meredekségű.

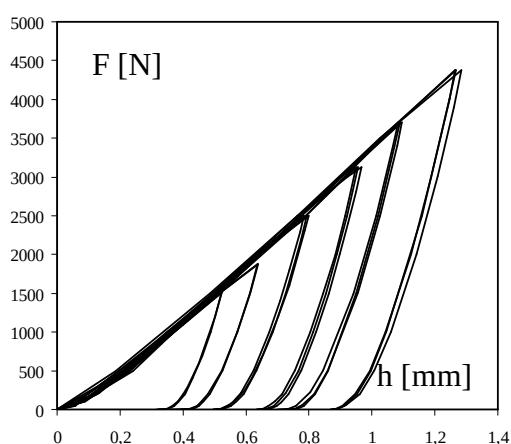
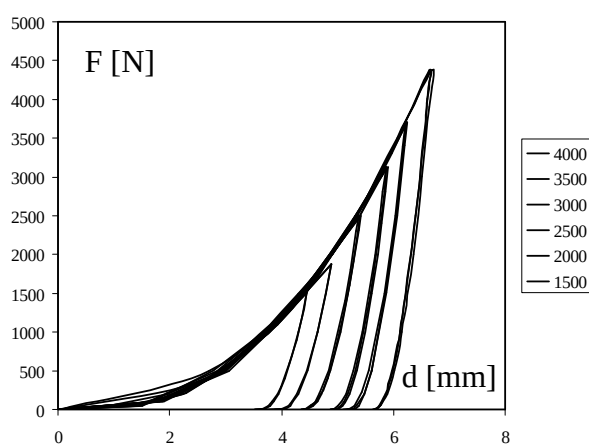


3.54 ábra: Értelmezést segítő ábra

3.55 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében3.56 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata3.57 ábra: Maximális (d_m) maradó (d_r) és benyomódási átmérő kapcsolata3.58 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

A 3.55 ábrán látható, hogy a riolitufánál már a kezdeti disszipálódott energia is nagyobb mint a rugalmas energia. Ha ezeket az energia arány – terhelő erő ábrákat egy ábrában jelenítenénk meg jól látható lenne a függvények egymáshoz képesti eltolódása, ahogy a rugalmas viselkedéstől haladunk az egyre képlékenyebb viselkedés felé.

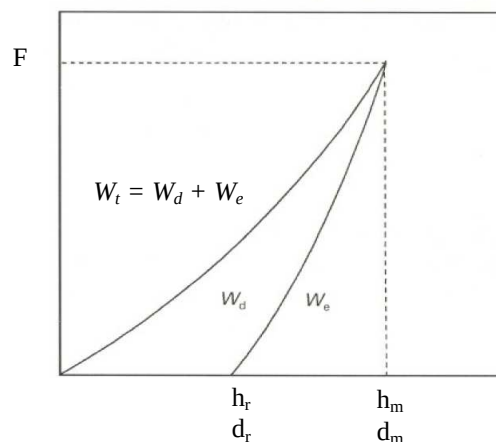
Rugalmas-képlékeny anyagok: 6. Burkolótégla

3.59 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés3.60 ábra: Benyomódási átmérő (d) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

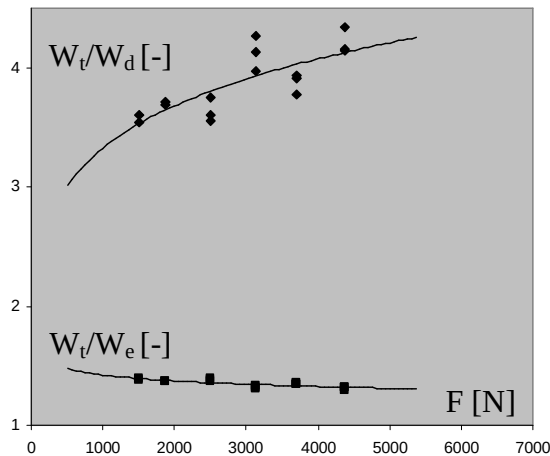
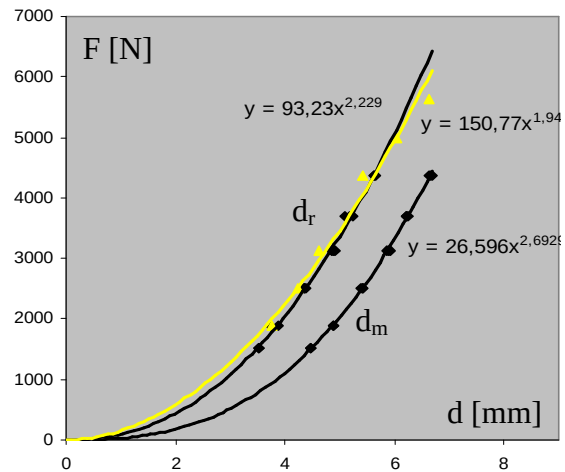
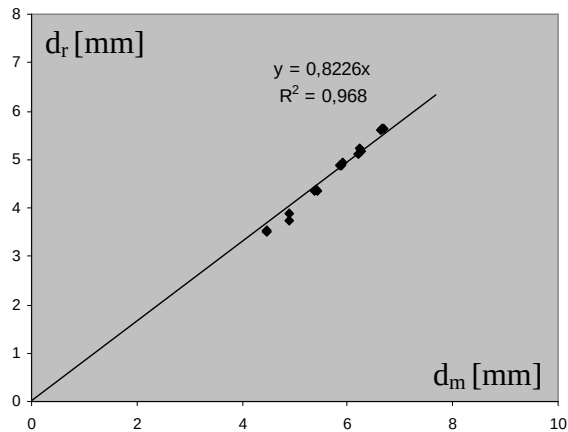
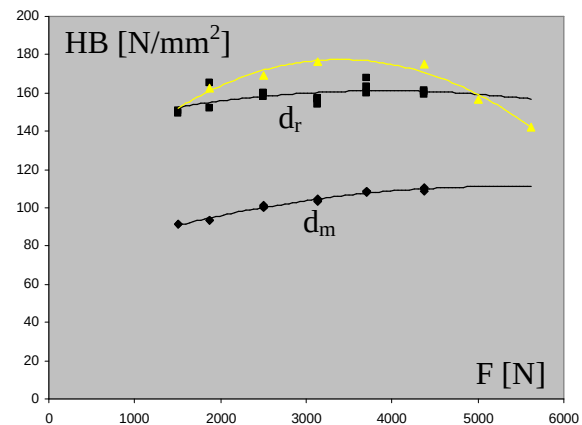
3.9 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
1504,2	0,524	0,321	356,2	100,6	255,5	4,456646	3,525314
1504	0,524	0,318	347,7	96,6	251,1	4,456646	3,509345
1875,4	0,637	0,392	549,7	149,2	400,5	4,884355	3,88141
1878,4	0,639	0,362	556,4	149,6	406,8	4,891494	3,735749
2501,2	0,798	0,497	912,7	253,7	658,99	5,419666	4,346489
2500,6	0,785	0,497	878	247,3	630,7	5,379136	4,346489
2501,7	0,793	0,505	915,8	243,9	671,9	5,404128	4,379486
3127,4	0,951	0,632	1384,6	348,5	1036,1	5,86706	4,866447
3126,4	0,956	0,636	1384,7	335,4	1049,2	5,880838	4,88078
3128,3	0,966	0,647	1448,8	339,7	1109,1	5,908246	4,919915
3704,7	1,088	0,737	1815,9	461,1	1354,8	6,227762	5,225641
3705,8	1,096	0,722	1867	477,6	1389,5	6,24781	5,176376
3701,1	1,083	0,701	1806,1	477,8	1328,3	6,215179	5,106309
4378,1	1,262	0,863	2551,9	614,3	1937,6	6,641493	5,616131
4378,6	1,267	0,87	2596,4	625,7	1970,7	6,652732	5,636701
4377,2	1,282	0,874	2699,6	622,8	2076,8	6,686247	5,648407

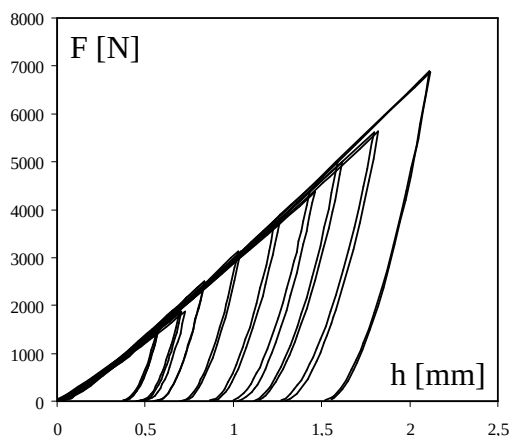
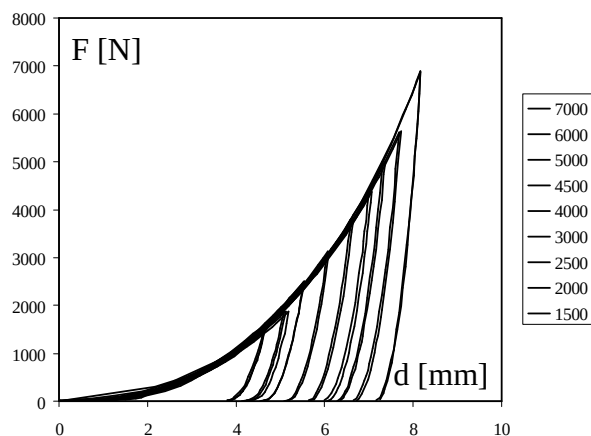
Az eddig felsorolt rugalmas-képlékeny viselkedés figyelhető meg ebben az esetben is.



3.61 ábra: Értelmezést segítő ábra

3.62 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében3.63 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata3.64 ábra: Maximális (d_m) és maradó (d_r) benyomódási átmérő kapcsolata3.65 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

Minden ábrán az eddig felsorolt rugalmas-képlékeny anyagokra jellemző tulajdonságok fedezhetők fel. A 3.62 ábrán megfigyelhető a rugalmasnál nagyobb, terhelés növelésével tovább növekvő disszipálódott energia. A 3.63 ábrán látható az F - d kapcsolatot leíró hatványfüggvény kitevője közel 2. A 3.64 ábra mutatja, hogy burkolótéglánál a maradó és a maximális benyomódási átmérő között lineáris a kapcsolat. A 3.65 ábrán látható a maximális keménységhez tartozó adott erőérték.

Képlékeny anyagok:**1. Silka mészhomoktégla**3.66 ábra: Nyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés3.67 ábra: Nyomódási átmérő (d) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

3.10 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

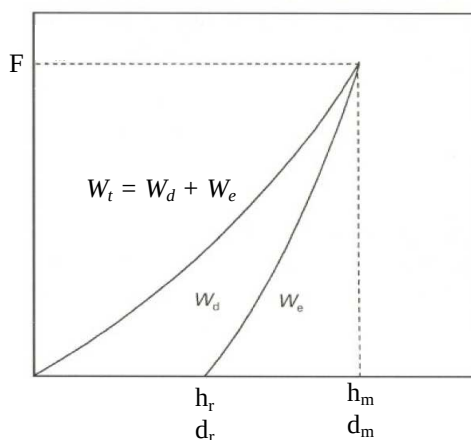
F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
1502,3	0,573	0,377	391,8	96,4	295,4	4,648299	3,809394
1505	0,564	0,375	389,1	97,9	291,2	4,61385	3,799671
1502,4	0,572	0,382	396,1	95,3	300,8	4,644487	3,833576
1878	0,693	0,446	567,2	141,3	425,8	5,079272	4,128479
1877,9	0,726	0,485	619,9	142,5	477,5	5,189576	4,296405
2503,6	0,836	0,547	960,1	237,4	722,7	5,53574	4,547875
3129,2	1,043	0,704	1480,8	362,6	1118,2	6,112987	5,116399
3131	1,025	0,695	1444,2	353,8	1090,4	6,066094	5,08605
3803,8	1,267	0,882	2239,7	529,3	1710,4	6,652732	5,671711
3802	1,241	0,869	2191,9	516	1675,9	6,593912	5,633769
4376,9	1,461	1,022	3017	679,6	2337,4	7,064129	6,058223
5003,3	1,619	1,147	3810,9	888,8	2922,1	7,367181	6,373191
5630,4	1,823	1,294	4861,2	1076,8	3784,4	7,721832	6,712843
5609,9	1,799	1,27	4752,1	1089	3663,1	7,682083	6,659459
6878,9	2,116	1,554	6748,96	1454,6	5294,4	8,168854	7,245712
6883,2	2,112	1,517	6813,6	1478,6	5335	8,163199	7,174597

A képlékeny anyagokra, köztük a mészhomoktégla, jellemző, hogy a maradó és a maximális nyomódás átmérő nagysága közel azonos.

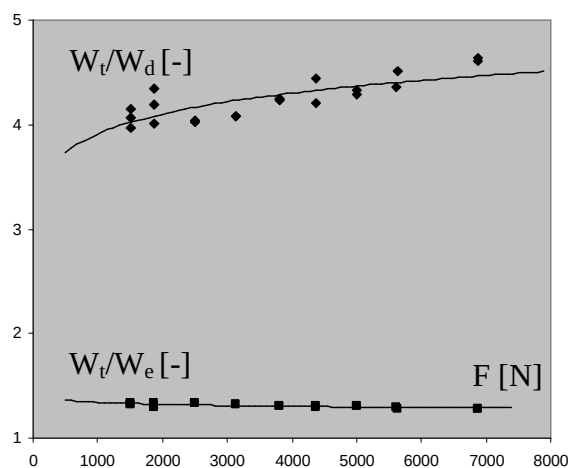
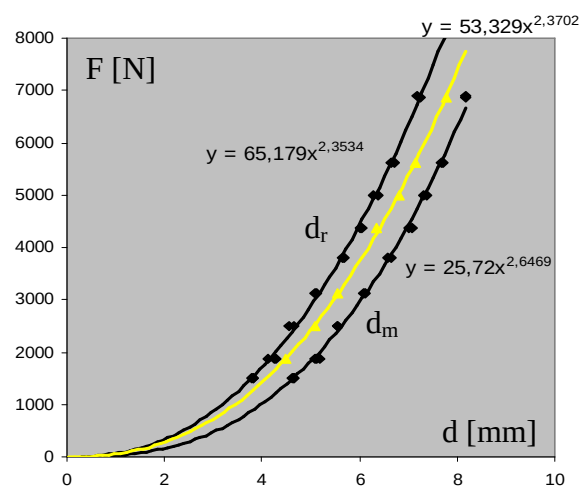
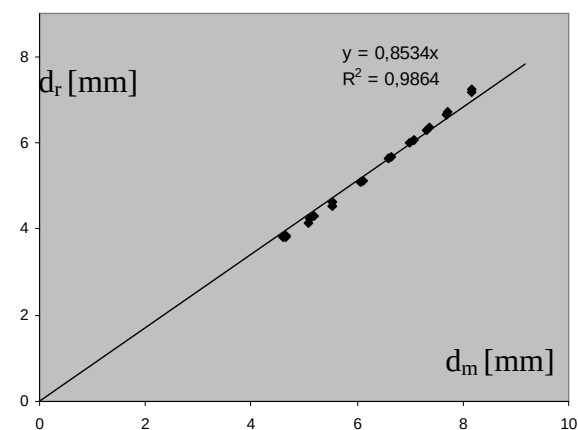
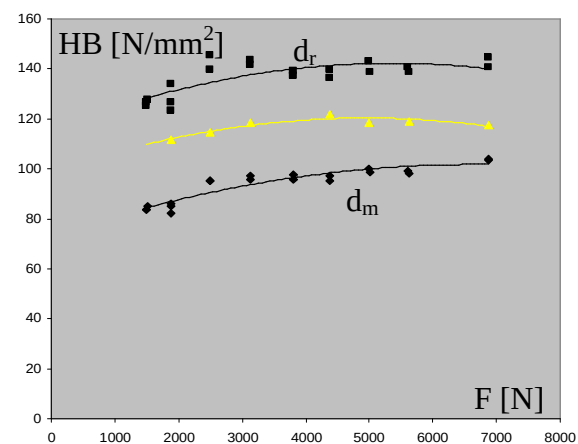
A rugalmas energia jóval kisebb százalékát adja a teljes energiának, mint a rugalmas-képlékeny anyagoknál.

Az $F-h$ függvény terhelési szakasza a kezdeti görbétől eltekintve lineárisnak tekinthető.

Az $F-d$ diagramon jól látható, hogy a tehermentesítési szakasz közel függőleges, amiből adódik, hogy a maradó és a maximális nyomódás átmérő közel azonos.



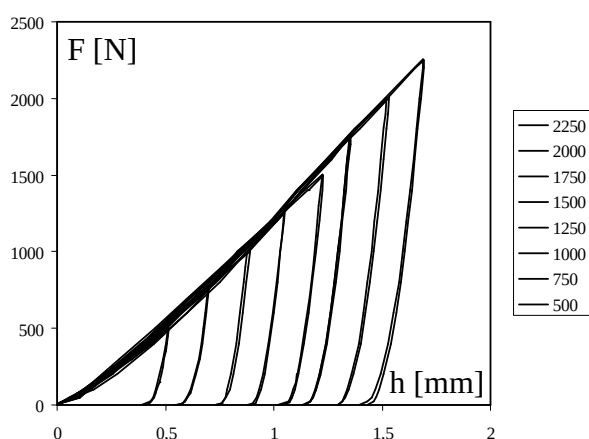
3.68 ábra: Értelmezést segítő ábra

3.69 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében3.70 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata3.71 ábra: Maximális (d_m) és maradó (d_r) benyomódási átmérő kapcsolata3.72 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

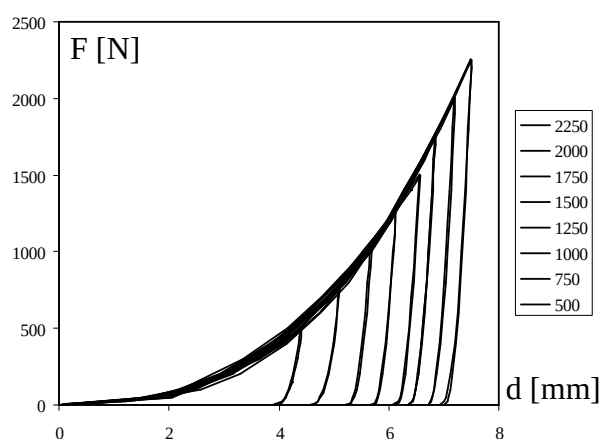
A 3.69 ábrán megfigyelhető, hogy a rugalmas energia teljes energiához viszonyított aránya teher függetlenné válik, minden teherszinten egy konstans értéket vesz fel. Ez a megállapítás a további képlékeny anyagok esetén is megfigyelhető lesz.

A 3.70, 3.71 és 3.72 ábrákon elsősorban a rugalmas képlékeny anyagoknál már említett tulajdonságok figyelhetőek meg.

Képlékeny anyagok: 2. Durva mészkő (B)



3.73 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

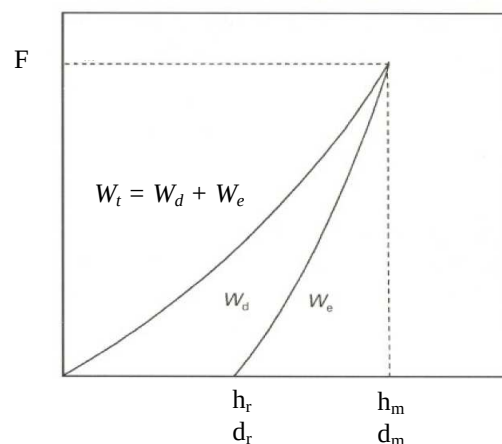


3.74 ábra: Benyomódási átmérő (d) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

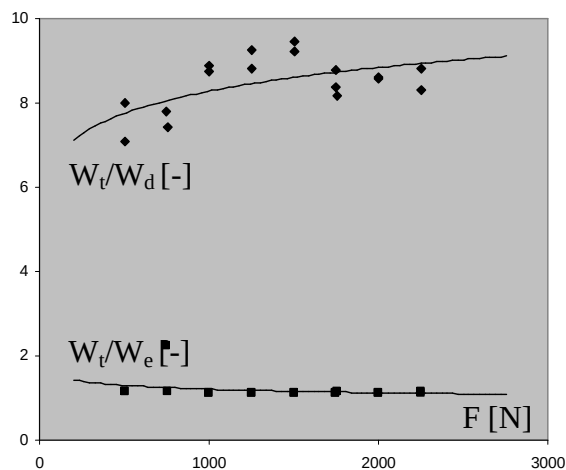
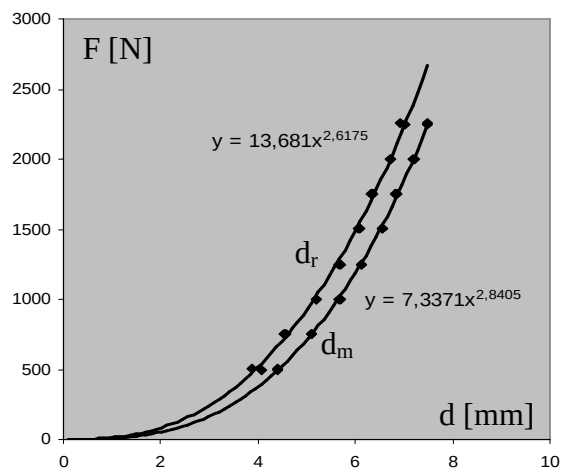
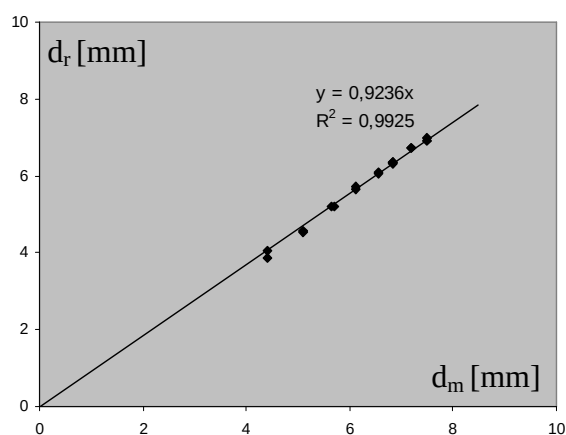
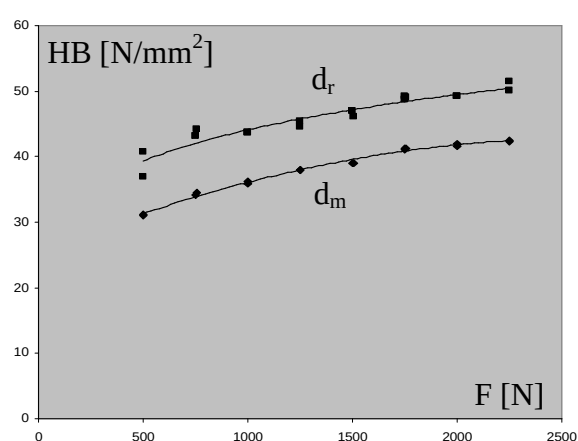
3.11 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
500	0,51	0,431	121	17,1	103,9	4,399955	4,061644
501,2	0,513	0,391	120,6	15,05	105,5	4,412179	3,876658
750,7	0,7	0,554	236,9	30,4	106,4	5,10294	4,575187
755	0,698	0,543	240	32,3	207,8	5,096193	4,532174
1000,7	0,877	0,73	405,7	46,3	359,4	5,657162	5,20273
1251	1,048	0,877	621,3	70,4	550,9	6,125911	5,657162
1251,6	1,049	0,894	606,9	65,7	541,3	6,128491	5,706405
1501,2	1,222	1,018	876,8	92,6	784,2	6,550333	6,047702
1505	1,23	1,04	862,1	93,4	768,7	6,568744	6,105211
1750,3	1,355	1,132	1056,2	126,1	930,1	6,845137	6,336742
1755	1,351	1,14	1049,6	128,7	920,9	6,836607	6,356225
2001	1,519	1,295	1337,8	156,2	1181,6	7,178479	6,71505
2002,1	1,532	1,296	1384,3	160,7	1223,6	7,203604	6,717257
2251,2	1,692	1,431	1760,2	199,4	1560,8	7,498569	7,003496
2252,8	1,688	1,391	1756,5	211,9	1544,6	7,491503	6,921017

A mészhomoktéglánál tett megállapítások vonatkoznak a B jelű durva mészkőre is.

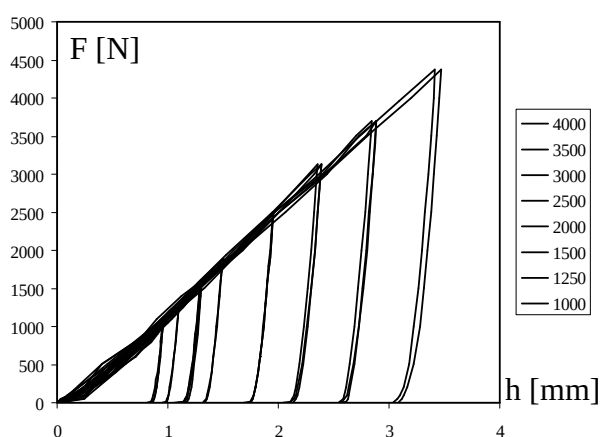


3.75 ábra: Értelmezést segítő ábra

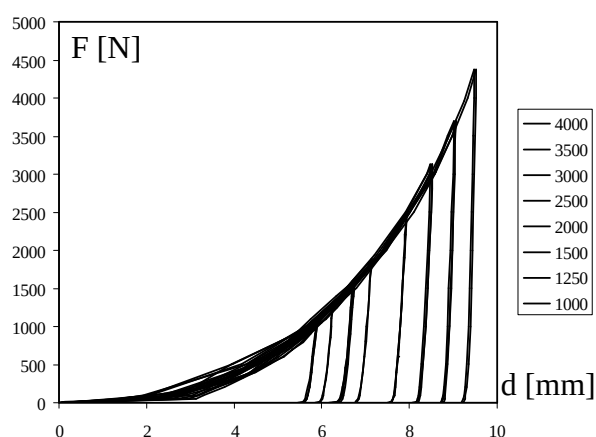
3.76 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében3.77 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata3.78 ábra: Maximális (d_m) és maradó (d_r) benyomódási átmérő kapcsolata3.79 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

Az eddigi feltevések vonatkoznak ezekre ábrákra is, bár a 3.77 és a 3.79 ábrákon tett megfigyelések itt nem jelennek meg. Az F - d kapcsolatot leíró hatványfüggvény kitevője közelebb van a 3-hoz, mint a 2-höz. Az F - HB kapcsolat maximális értékét feltehetően nem értük el, mivel a visszaeső ágat nem látjuk.

Képlékeny anyagok: 3. Durva mészkő (A)



3.80 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés



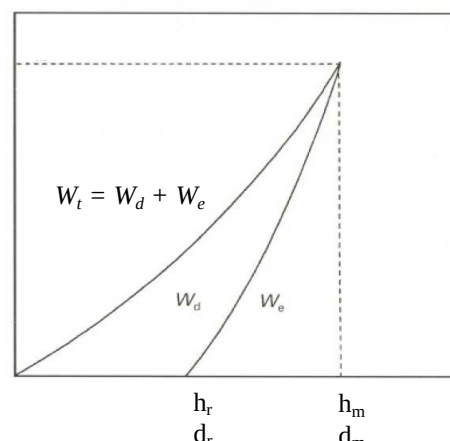
3.81 ábra: Benyomódási átmérő (d) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

3.12 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

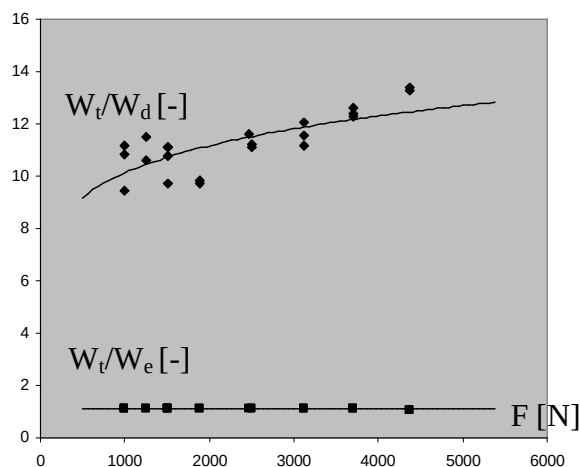
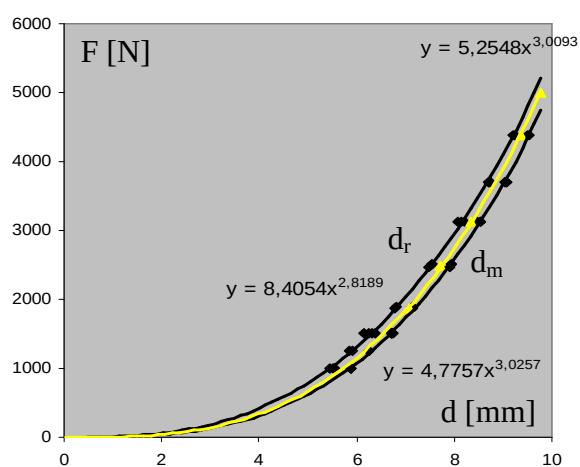
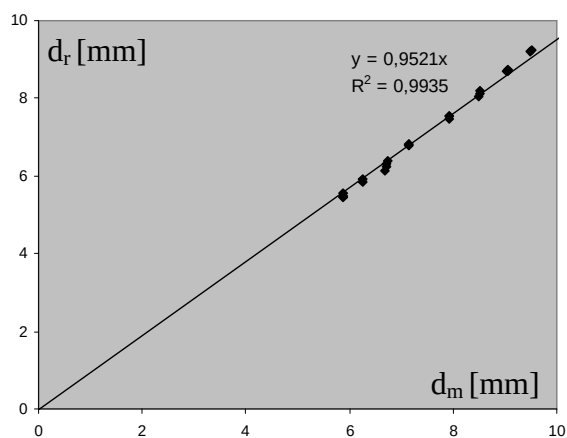
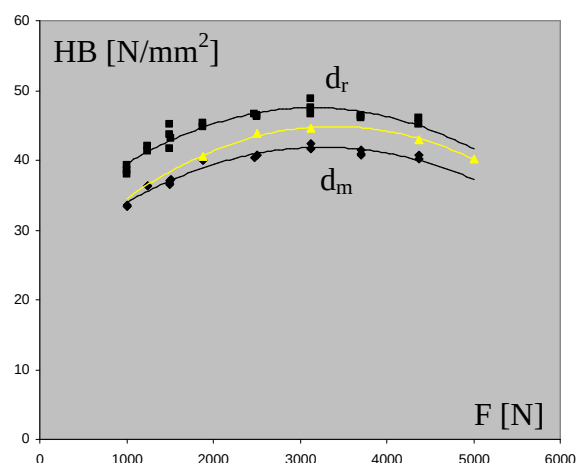
F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
1002,6	0,95	0,84	381,6	40,4	341,2	5,864299	5,547756
1000,5	0,955	0,825	395,5	36,6	358,9	5,878086	5,502499
1000,6	0,955	0,811	402,5	36,1	366,4	5,878086	5,459773
1250,9	1,098	0,946	594,5	55,9	538,6	6,252806	5,853233
1250,7	1,097	0,964	608,2	52,9	555,3	6,250309	5,90278
1516	1,294	1,119	856,2	88	768,2	6,712843	6,304868
1500,19	1,299	1,095	887,3	80	807,3	6,723868	6,24531
1502,4	1,307	1,149	891,9	80,1	811,9	6,741439	6,378024
1886	1,504	1,341	1231,2	126,6	1104,6	7,149261	6,815194
1880	1,498	1,321	1238,1	125,6	1112,5	7,137505	6,771989
2500,9	1,955	1,719	2254,9	200,9	2054	7,931702	7,54587
2471	1,947	1,685	2153,4	185,6	1967,7	7,919392	7,486194
3128,4	2,354	2,039	3368,5	292,2	3076,3	8,484971	8,05791
3700,4	2,882	2,557	5016,7	397,3	4619,4	9,058493	8,725079
3702,3	2,843	2,541	4911,1	397,3	4513,8	9,021608	8,707082
3700	2,886	2,549	4988,1	406,1	4581,9	9,06223	8,7161
4376,1	3,47	3,08	7315,7	552	6763,7	9,520315	9,233331
4375,3	3,417	3,029	7220,3	539,4	6680,8	9,485591	9,190247

Az A jelű durva mészkő szinte tökéletesen képlékeny módon viselkedik, a maradó alakváltozások gyakorlatilag megegyeznek F a maximális alakváltozásokkal.

Akár csak a rugalmas anyagoknál, itt is nagyságrendi különbség keletkezik a két energia között, azonban most a disszipálódott energia javára.

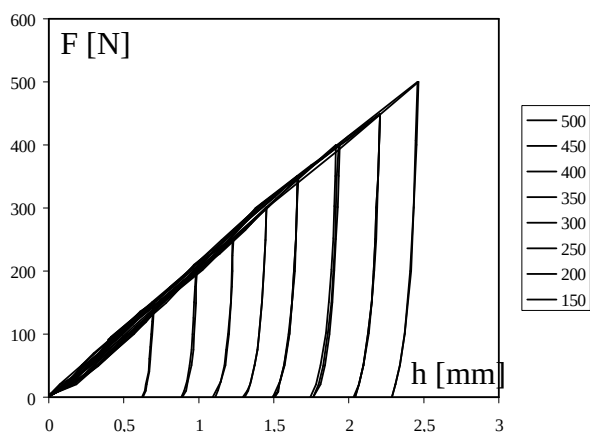
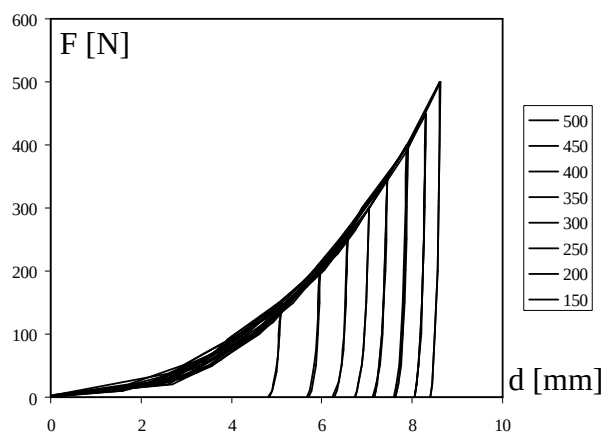


3.82 ábra: Értelmezést segítő ábra

3.83 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében3.84 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata3.85 ábra: Maximális (d_m) és maradó (d_r) benyomódási átmérő kapcsolata3.86 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

A képlékeny anyagokra tett megállapítások vonatkoznak a jelenlegi ábrákra is.

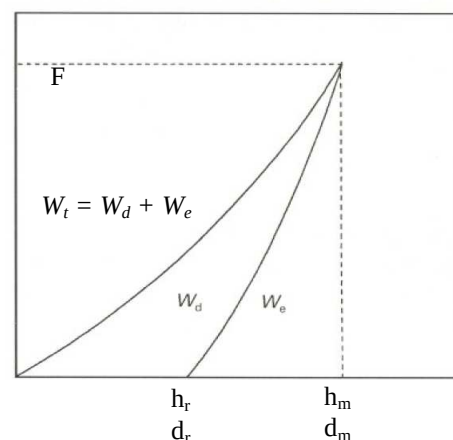
A 3.86 ábrán nagyon jól megfigyelhető a 2.6 fejezetben leírt jelenség.

Képlékeny anyagok: 4. Ytong pórusbeton

 3.87 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

 3.88 ábra: Benyomódási átmérő (d) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

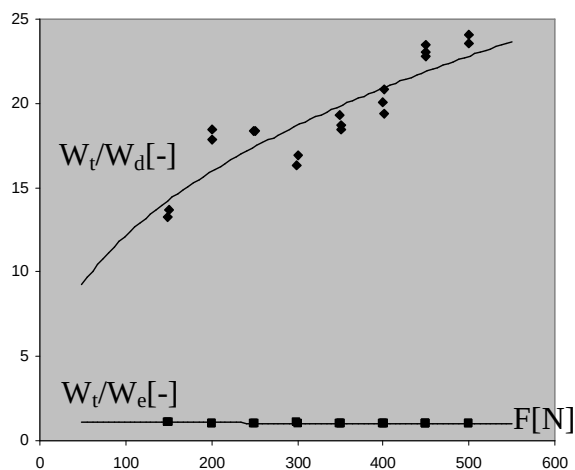
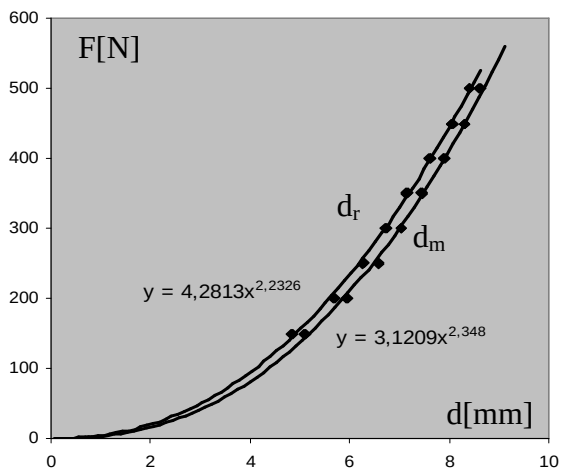
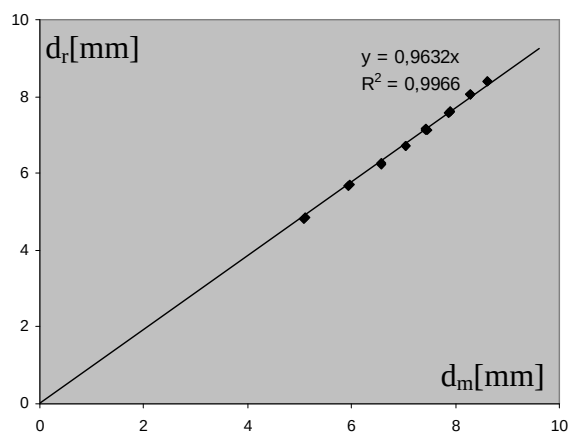
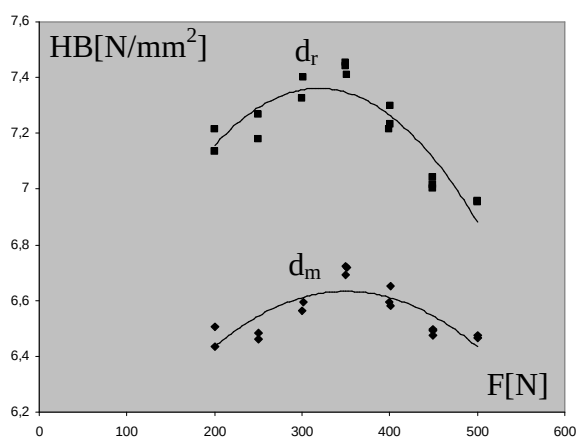
3.13 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
149	0,703	0,626	51,8	3,9	48	5,113039	4,844842
150	0,697	0,621	50,8	3,7	47	5,092815	4,826742
200,1	0,979	0,883	100,1	5,6	94,5	5,943588	5,674614
200	0,989	0,892	101,7	5,5	96,2	5,970554	5,700644
250,1	1,228	1,109	159,9	8,7	151,2	6,56415	6,280165
249,8	1,231	1,094	159,9	8,7	151,2	6,571039	6,242808
300,8	1,452	1,294	215,1	12,7	202,4	7,046047	6,712843
350,5	1,661	1,506	291,4	15,6	275,8	7,443408	7,153171
349,4	1,662	1,495	299,3	15,5	283,8	7,445201	7,131613
400,7	1,938	1,764	384,7	18,5	366,2	7,905481	7,623202
400,1	1,931	1,765	381,7	19	362,7	7,894616	7,6249
449,6	2,21	2,044	501,6	21,8	479,9	8,298409	8,06525
449,8	2,204	2,041	496,1	21,1	474,9	8,290328	8,060848
500	2,462	2,288	614,1	26,1	588,1	8,615929	8,401204
500,1	2,459	2,289	616,9	25,6	591,4	8,612391	8,402495

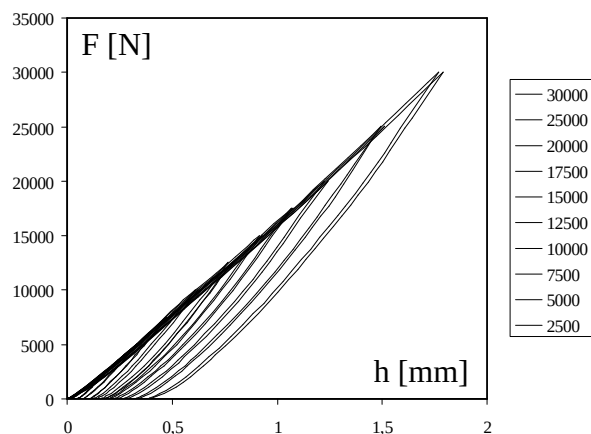
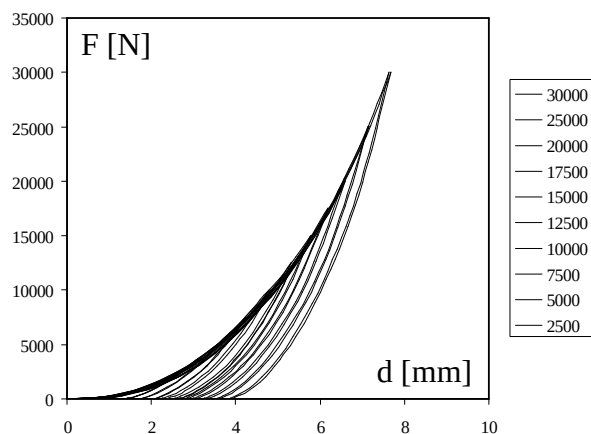
Tökéletesen képlékeny anyag, gyakorlatilag nulla rugalmas energiával. A rugalmas energia értéke elhanyagolható a disszipálódott energiához képest. Így a teljes energia értéke közel azonosnak tekinthető a disszipálódott energiáival.



3.89 ábra: Értelmezést segítő ábra

3.90 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében3.91 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata3.92 ábra: Maximális (d_m) és maradó (d_r) benyomódási átmérő kapcsolata3.93 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

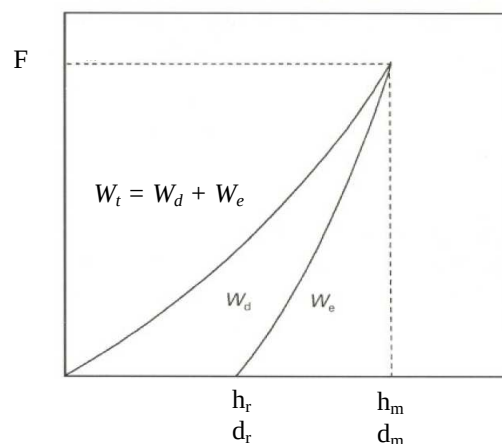
A képlékeny anyagokra eddig leírt értékelések, az egyre inkább képlékeny viselkedésű anyagoknál egyre markánsabban kimutathatóak.

Fémek: 1. Betonacél3.94 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés3.95 ábra: Benyomódási átmérő (d) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

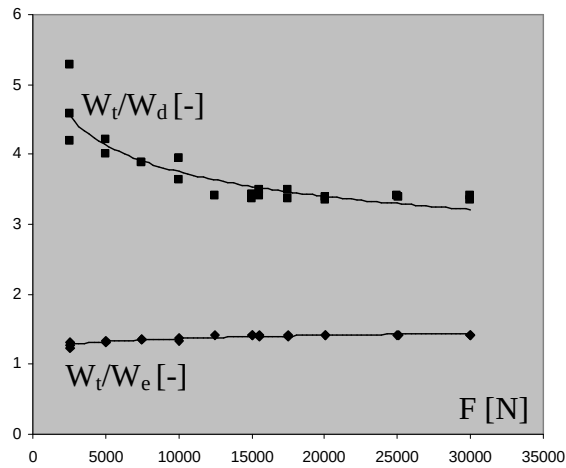
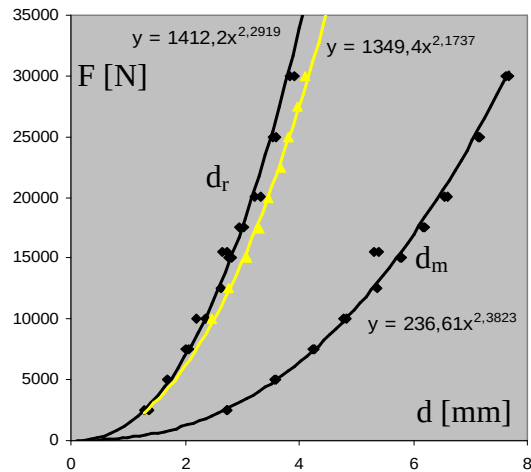
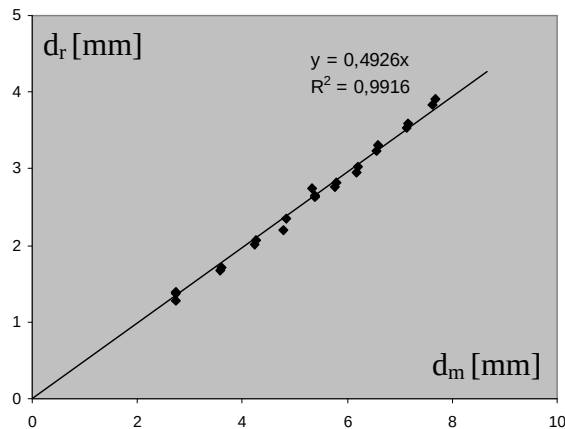
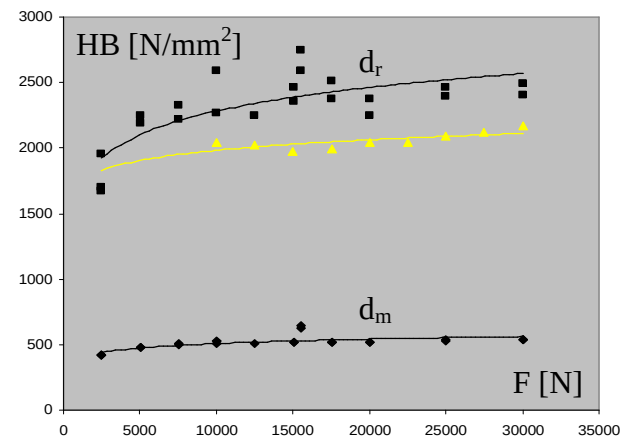
3.14 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
2520,4	0,192	0,041	220,1	167,6	52,5	2,744548	1,277997
2512,1	0,191	0,047	208,9	169,3	39,6	2,737531	1,367905
5023,1	0,331	0,071	778,7	593,5	185,1	3,577954	1,679237
5018,2	0,334	0,073	790,3	593,3	197	3,593574	1,702552
7519	0,476	0,108	1689,1	1254,4	434,7	4,258368	2,067207
7516,3	0,473	0,103	1691,3	1255	436,3	4,245596	2,019298
10025,4	0,624	0,141	2974,3	2157,4	816,8	4,837613	2,358066
12519,7	0,784	0,177	4675,4	3301,2	1374,1	5,376	2,637173
15525,1	0,766	0,191	4618,9	3297,1	1321,9	5,319114	2,737531
15031,7	0,917	0,194	6637,5	4698	1939,5	5,77204	2,758524
17529	1,068	0,222	8936,8	6384,1	2552,7	6,177176	2,94667
17517,7	1,077	0,235	9038,4	6352,4	2686,1	6,200023	3,029703
20023	1,24	0,283	11684,1	8190,3	3493,7	6,591631	3,316571
25015,8	1,51	0,333	17868,7	12634,8	5233,9	7,160978	3,588376
25023,5	1,495	0,324	17838	12592,3	5245,8	7,131613	3,5412
30023	1,791	0,398	25404,5	17822,6	7581,9	7,668721	3,909781
30014,6	1,769	0,384	25124,6	17762,9	7361,7	7,631681	3,843199

A fémek a vizsgált anyagok közül a lineárisan rugalmas anyagokhoz hasonló viselkedést mutatnak. Képlékeny alakváltozások elsősorban magasabb teherszinten alakulnak ki. A rugalmas és a disszipálódott energia értéke is jelentősen hozzájárul a teljes energia értékéhez.

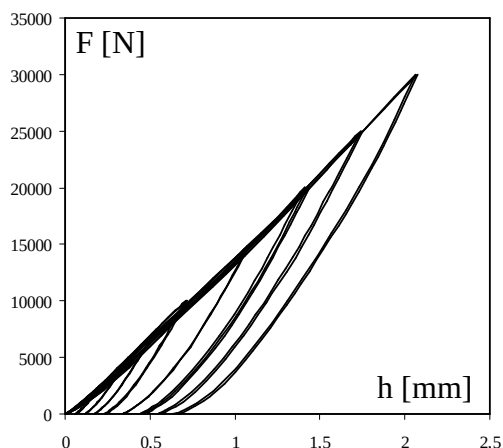
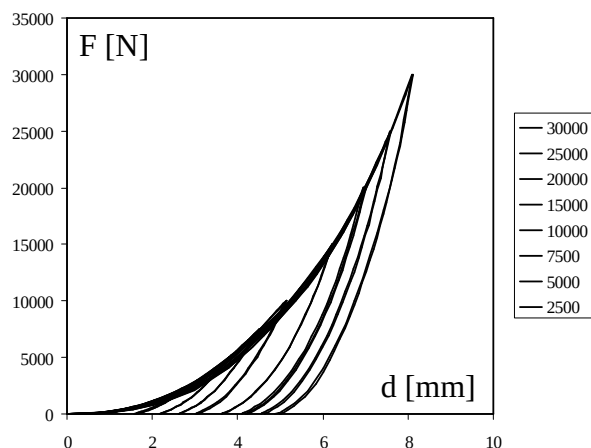


3.96 ábra: Értelmezést segítő ábra

3.97 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében3.98 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata3.99 ábra: Maximális (d_m) és maradó (d_r) benyomódási átmérő kapcsolata3.100 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

A 3. 97 ábra egy a rugalmas-képlékeny anyagoknál megfigyelt viselkedéshez hasonlít. A rugalmas energia hatása jelentős, de a terhelő erő növelésével nő a disszipálódott energia teljes energiához viszonyított aránya (W_d/W_t).

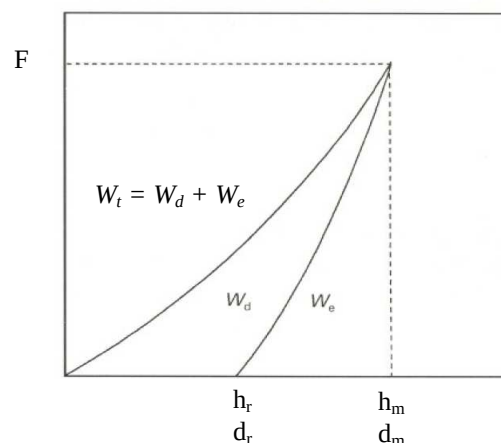
A 3.100 ábra igazolja, hogy a fémeknél a vizsgált erőszinteken nem mutatható ki olyan teherérték, amelyhez egy maximális HB érték tartozna. A keménység értéke a teher értékével egyenletesen nő.

Fémek: 2. Lágyacél3.101 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés3.102 ábra: Benyomódási átmérő (d) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

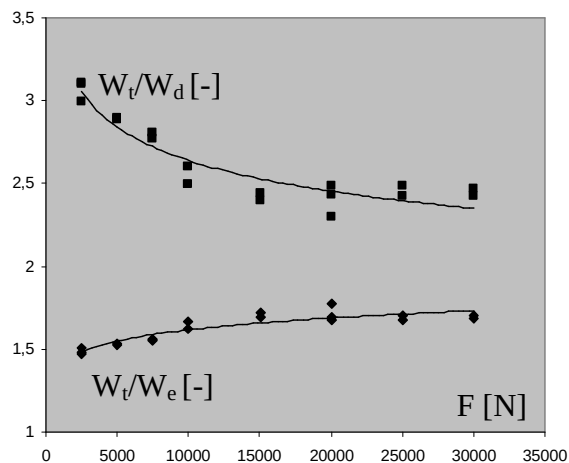
3.15 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
2510,7	0,209	0,068	240,5	162,9	77,6	2,860992	1,643625
2506,6	0,207	0,066	243,9	162,3	81,6	2,847561	1,619437
5019,1	0,374	0,119	876,8	573,6	303,2	3,794799	2,168722
7508,3	0,539	0,174	1884,2	1212,5	671,7	4,516405	2,615128
7514,9	0,537	0,175	1895,8	1211,7	684,1	4,508495	2,622499
10012,9	0,712	0,23	3393,4	2087,4	1306	5,143173	2,998066
15011,6	1,086	0,341	7828,4	4624,5	3204	6,222734	3,629721
15014,9	1,089	0,342	7950,1	4631,8	3318,3	6,230274	3,634851
20008,8	1,41	0,44	13304,6	7953,6	5351	6,960431	4,101902
20015	1,436	0,47	13974,6	7884,3	6090,3	7,013674	4,232777
25007,4	1,738	0,545	20439,9	12224	8216,3	7,578748	4,540033
25009,3	1,749	0,571	20645,8	12122	8523,9	7,597631	4,640672
30019,9	2,062	0,632	28981,8	17219	11762,9	8,091516	4,866447
30010,6	2,077	0,662	29335,2	17235	12100,1	8,113217	4,972627

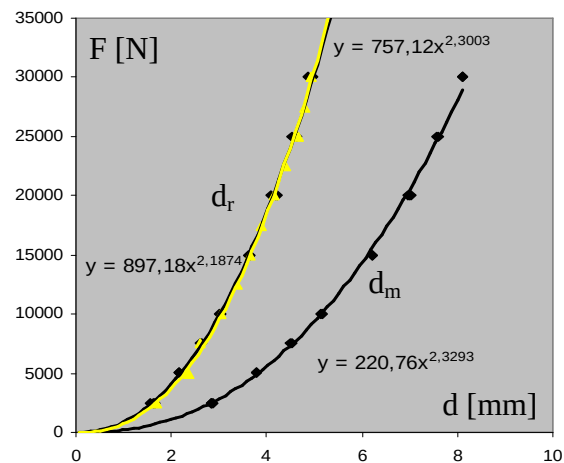
A lágyacél a betonacélnál képlékenyebb módon viselkedik, nagyobb maradó alakváltozás értékekkel.



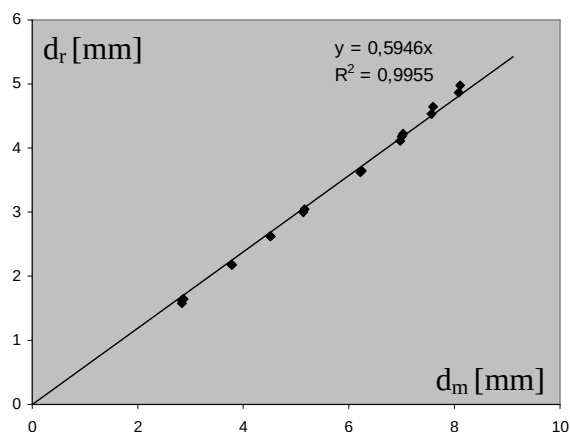
3.103 ábra: Értelmezést segítő ábra



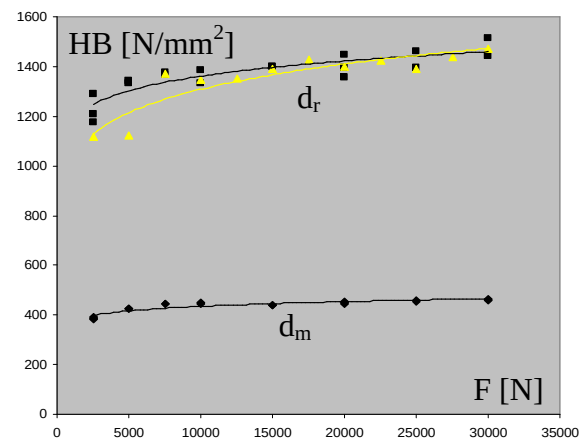
3.104 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében



3.105 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata

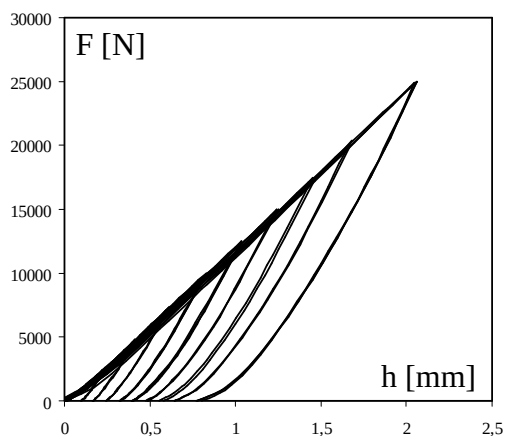
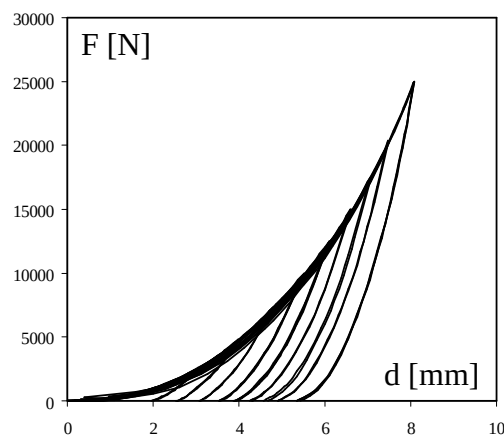


3.106 ábra: Maximális (d_m) és maradó (d_r) benyomódási átmérő kapcsolata



3.107 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

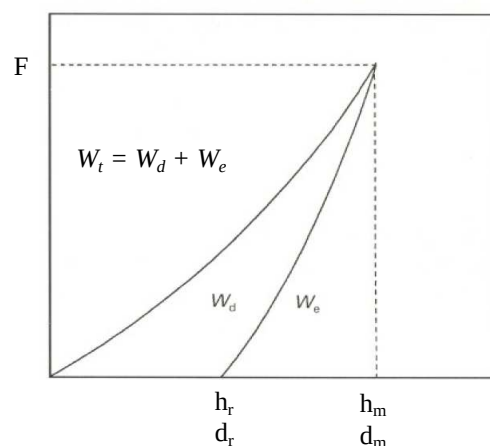
A 3.104 ábrán is megfigyelhető, akárcsak egyes rugalmas-képlékeny anyagoknál, hogy a teher növelésével a W_t/W_e és a W_t/W_d arány azonos értékhez (2) tart. Ez azt jelenti, hogy a teljes energia fele rugalmas, fele disszipálódott energia.

Fémek: 3. Alumínium3.108 ábra: Benyomódási mélység (h) és terhelőerő (F) közötti összefüggés3.109 ábra: Benyomódási átmérő (d) és terhelőerő (F) közötti összefüggés

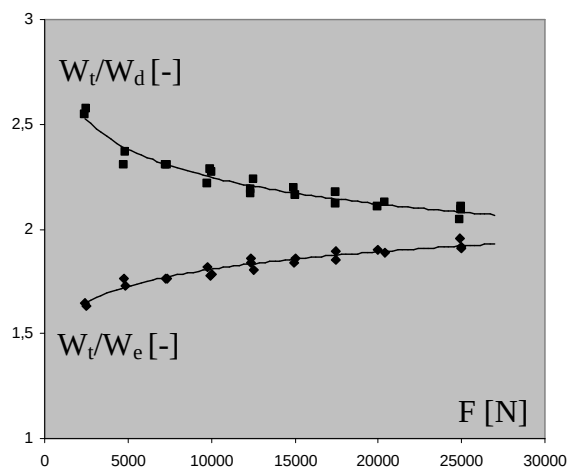
3.16 táblázat: Mérési eredmények összefoglalása

F [N]	h_m [mm]	h_r [mm]	W_t [Nmm]	W_e [Nmm]	W_d [Nmm]	d_m [mm]	d_r [mm]
2459	0,241	0,101	261,1	158,6	102,4	3,067194	1,999799
2485,9	0,241	0,096	273,7	167,4	106,4	3,067194	1,950163
4750,8	0,414	0,168	921,6	522	399,5	3,984271	2,570429
4828,9	0,414	0,162	939,7	542,7	397	3,984271	2,524881
7270,1	0,608	0,243	2095,8	1187,5	908,3	4,779262	3,079579
9805,5	0,825	0,327	3882,9	2132,8	1750,1	5,502499	3,557005
9990	0,83	0,321	4004,5	2243,2	1761,3	5,517644	3,525314
12357,8	1,037	0,399	6141,9	3336,4	2805,5	6,097419	3,914485
12506,4	1,036	0,393	6265,3	3467,7	2797,6	6,094819	3,886155
14999,4	1,244	0,474	8871,4	4833,8	4037,5	6,600747	4,249858
15005,8	1,25	0,484	9043,6	4858,3	4185,3	6,614378	4,292199
17487,3	1,471	0,58	12222,8	6464,2	5758,5	7,084112	4,674869
19979,2	1,668	0,644	15777	8299,1	7477,8	7,455944	4,909283
20390	1,679	0,644	16331,7	8659,5	7672,1	7,475549	4,909283
24998,4	2,059	0,773	24473,2	12775,5	11697,6	8,087155	5,341337
25002,4	2,06	0,804	24214,6	12713,7	11500,9	8,088609	5,438229

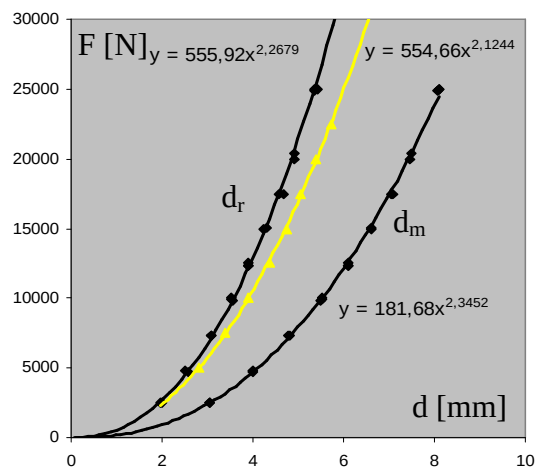
A három vizsgált fém közül a leginkább képlékeny viselkedő anyag. A kialakuló rugalmas és disszipálódott energia, közel azonos értékűek, megfelelően nagy terhelés esetén.



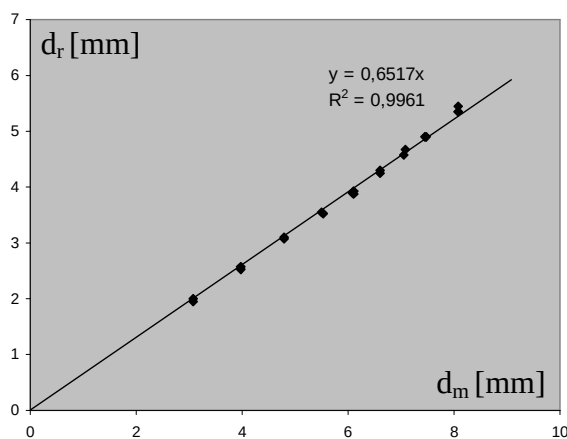
3.110 ábra: Értelmezést segítő ábra



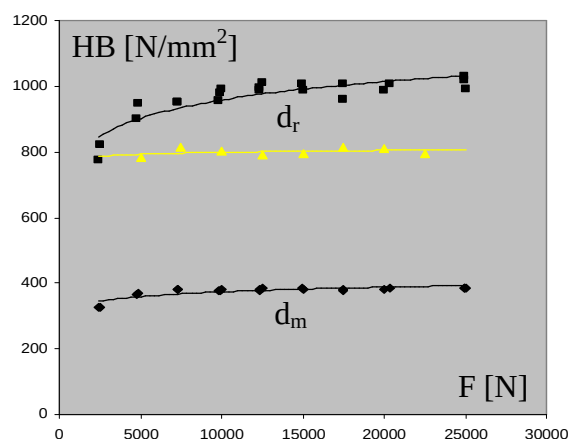
3.111 ábra: Energia arányok a terhelőerő (F) függvényében



3.112 ábra: Benyomódási átmérő (d) és a terhelőerő (F) kapcsolata



3.113 ábra: Maximális (d_m) és maradó (d_r) benyomódási átmérő kapcsolata



3.114 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése

Az előző két fémre bemutatott jellegzetességek jelennek meg az alumínium esetében is.

A terhelőerő növelésével a W_t/W_e és a W_t/W_d energia arány az alumínium esetében tart a leghatározottabban 2-höz.

4. Vizsgálati eredmények értékelése

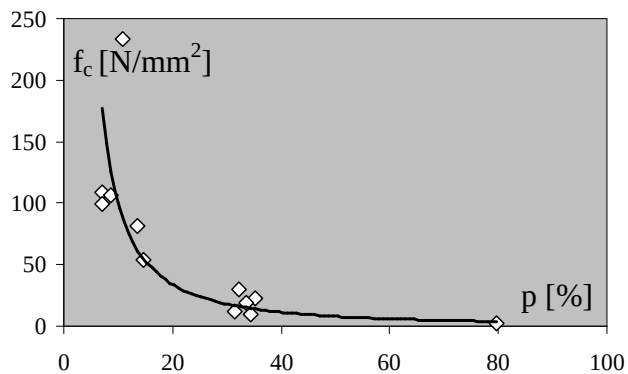
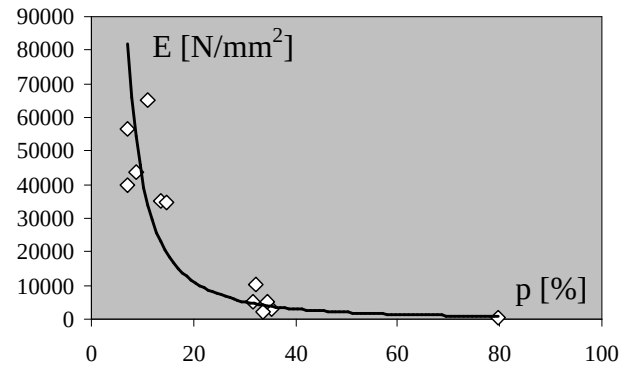
4.1 Bevezetés

Ez a fejezet az általam vizsgált anyagok vizsgálati eredményei alapján készített értékelést és az ebből levonható következtetéseket tartalmazza. A Meyer-féle hatványtörvény mellett a Brinell-keménység és a terhelőerő kapcsolatáról, valamint a rugalmassági modulus, a szilárdság és a keménység közötti összefüggésről adok pontosabb képet.

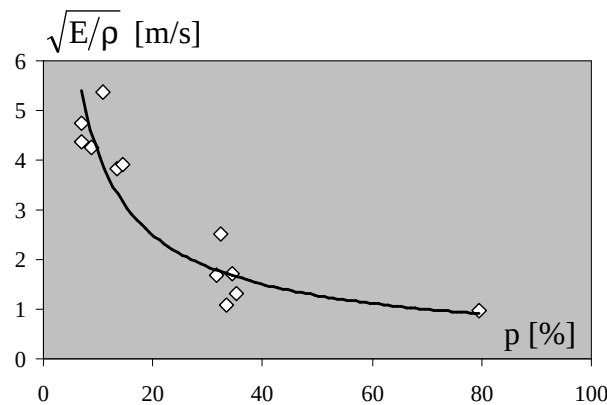
4.1 táblázat: A vizsgált minták fontosabb anyagjellemzői

<i>Anyag</i>	f_c [N/mm ²]	ρ_t [kg/m ³]	E [N/mm ²]	$\sqrt{E/\rho}$ [m/s]	p [V%]
Sárga klinker lap	233	2253,5	65000	5,37	10,9
Vörös klinker tégl	80,9	2370,3	35000	3,84	13,6
Tömött mészkő	108,5	2501,9	56402	4,75	6,99
HSC	106,2	2414,3	43802	4,26	8,7
Polimerbeton	98,7	2099	40000	4,36	6,96
Beton (v/c=0,65)	54,2	2257,5	34578	3,91	14,6
Riolittufa	30	1615,4	10206	2,51	32,3
Burkolótégla	23,3	1711,4	3000	1,32	35,3
Silka mészhomoktégla	19,3	1711,3	2000	1,08	33,5
Durva mészkő B	9,2	1769,6	5199	1,71	34,5
Durva mészkő A	12,4	1807,9	5127	1,68	31,5
Ytong pórusbeton	2,02	515,7	500	0,98	79,6
Betonacél	600	7850	200000	5,05	0
Lágyacél	420	7850	200000	5,05	0
Alumínium	350	2700	70000	5,09	0

A táblázatban felsorolt anyagok a 3. fejezetnek megfelelően vannak csoportokra osztva. A szilárdságuk mellett a táblázat tartalmazza az anyagok rugalmassági modulusát (E), testsűrűségét (ρ_t), porozitását (p) valamint a hang terjedési sebességét az anyagban ($\sqrt{E/\rho}$). Azért ezeket az anyagjellemzőket emeltem ki, mert ezek a legfontosabb anyagjellemzők az anyagtudományban, így ezek és a keménység között kerestem kapcsolatokat.

4.1 ábra: Porozitás (p) és szilárdság (f_c) kapcsolata

4.2 ábra: Porozitás (p) és rugalmassági modulus (E) kapcsolata

4.3. ábra: Porozitás (p) és hang terjedési sebessége ($\sqrt{E/\rho}$) kapcsolata

A szakirodalomban több helyen is fellelhető a porozitás (pórusok térfogat százaléka) és a szilárdság valamint a porozitás és a rugalmassági modulus közötti összefüggés porózus anyagokra vonatkoztatva, amely hatványfüggvény formájában adható meg:

$$f_c = f_{c,o}(1-p)^n$$

Ahol p a porozitás értéke, f_c a vizsgált minta nyomószilárdsága p porozitás mellett, $f_{c,o}$ a nulla porozitáshoz tartozó nyomószilárdság érték, n pedig konstans kitevő (Neville, 1995).

Az összefüggést exponenciális függvény formájában is lehet írni:

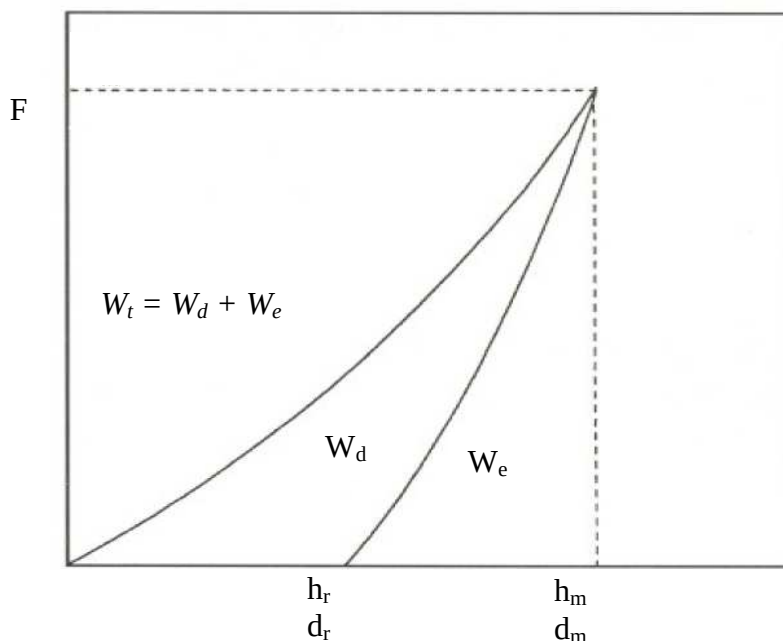
$$f_c = f_{c,o}e^{-kp}$$

Ahol k konstans érték, az összefüggés többi eleme az előzőekkel azonos (Mehta, Monteiro, 2005).

A 4.1, 4.2 és 4.3 ábrákról leolvasható, hogy a nagyobb porozitású anyagok nyomószilárdsága, rugalmassági modulusa, valamint bennük a hang terjedési sebessége kisebb. Ez bizonyítja, hogy az általam végzett mérések eredményei konzekvensek, tudományos értékelésre használhatóak.

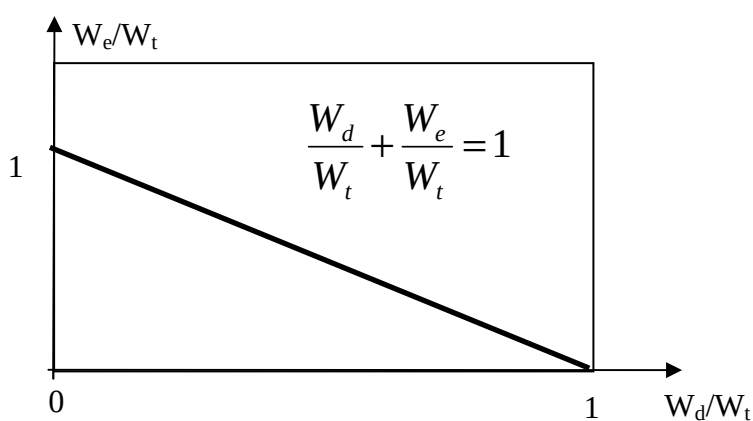
4.2 Rugalmas és disszipálódott energia kapcsolata DSI vizsgálatból

A próbatestbe benyomott golyó vizsgálata által előállítható erő-benyomódási mélység függvény jellemzésére legjobban a benyomáshoz szükséges energia használható. Az energia értéke a függvény alatti terület nagyságával egyenlő. A teljes energia két összetevőre bontható, rugalmas és disszipálódott energiára. A teljes energia ezek összegeként írható fel. Az alábbi elvi ábra ezt az összefüggést mutatja be.

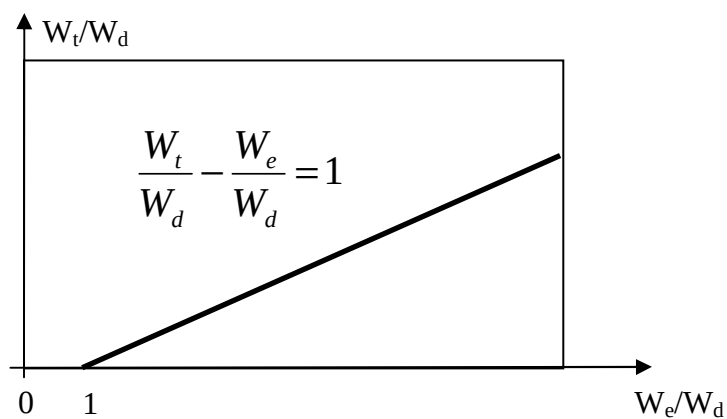


4.4 ábra: Rugalmas és disszipálódott energia megoszlása (elvi ábra)

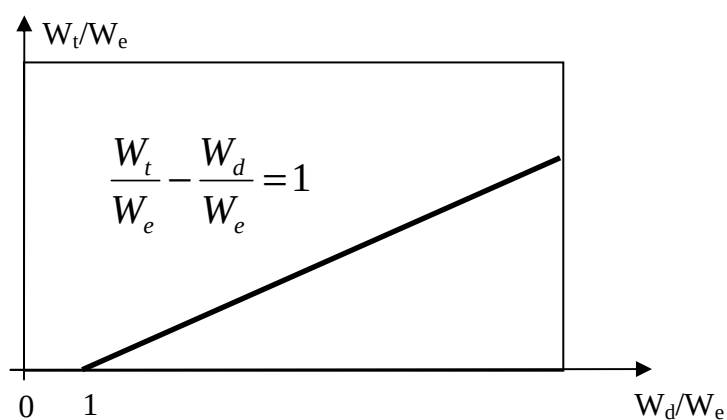
Ez az összefüggés némi átalakítás után a következő elvi ábrák valamint egyenletek formájában írható fel:



4.5 ábra: Disszipálódott és rugalmas energia kapcsolata elvi ábrája

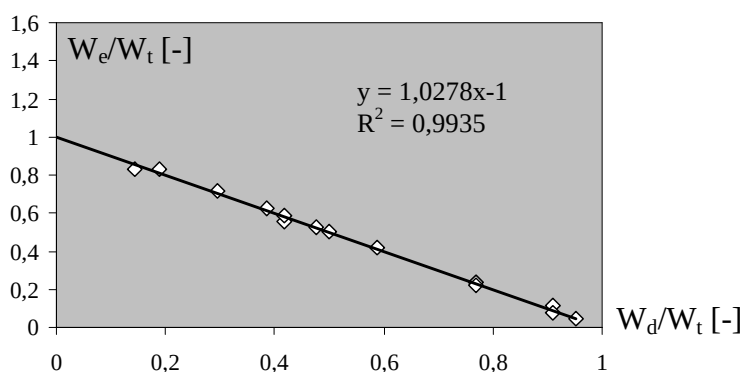


4.6 ábra: Disszipálódott és rugalmas energia kapcsolata elvi ábrája

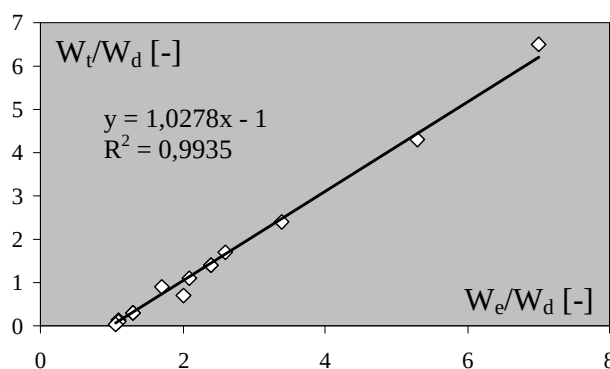


4.7 ábra: Disszipálódott és rugalmas energia kapcsolata elvi ábrája

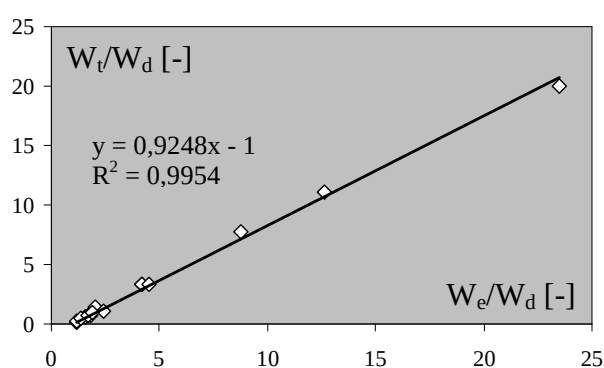
A mérési eredményeim helyességét bizonyítandó, felírtam ezeket az összefüggéseket az általam mért adatokra is. A következő ábrák ennek eredményeit vázolják:



4.8 ábra: Disszipálódott és rugalmas energia kapcsolata saját mérések alapján



4.9 ábra: Rugalmas és teljes energia kapcsolata saját mérések alapján



4.10 ábra: Rugalmas és teljes energia kapcsolata saját mérések alapján

A mérési eredményekből adódó függvény alakja egyértelműen lineáris valamint nagyon erős, egyhez közeli korrelációs tényezővel rendelkezik. Ezek alapján kijelenthető, hogy a mérések igazolják a szakirodalomban erre vonatkozó utalásokat valamint további tudományos munkára alkalmasak.

4.3 Meyer-féle hatványtörvények értékelése

A Meyer-féle hatványtörvény a 2.6 fejezetben leírtak szerint a terhelőerő (F) és a maradó benyomódás átmérője (d) közötti kapcsolatot fejezi ki a következő összefüggés szerint:

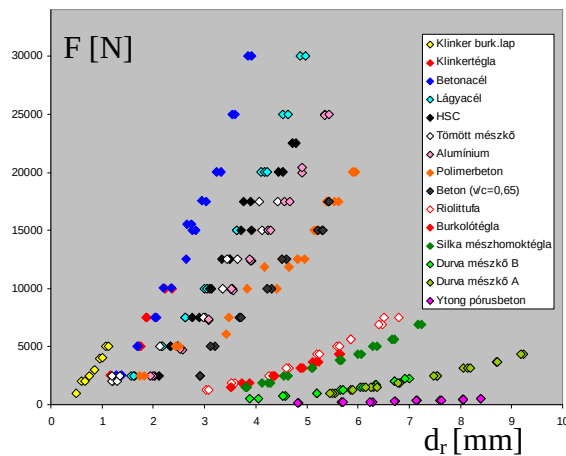
$$F = a \cdot d^n$$

A kitevő (n) értékét 2-re felvéve, az összefüggést behelyettesítve a Brinell-keménység képletébe, a következő összefüggés adódik:

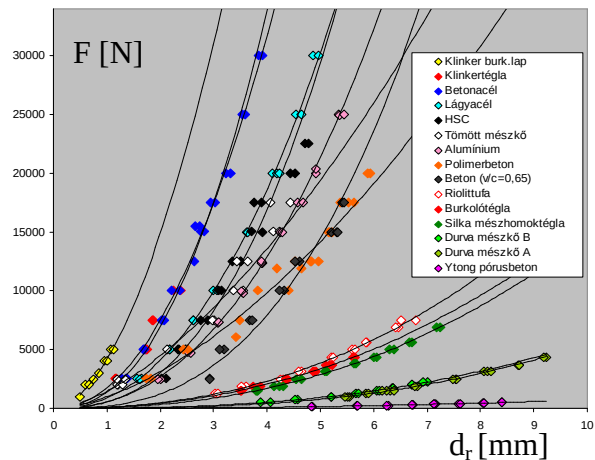
$$HB = \frac{2F}{D \cdot \pi \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - \frac{F}{a}} \right)}$$

Belátható, hogy mivel a behelyettesítés után sem esik ki F , így a keménység értéke az erőtől függő érték. Főleg kis terhelő erők esetén ez az eltérés nagy keménységbeli különbségeket tud adni (Gillemot, 1967).

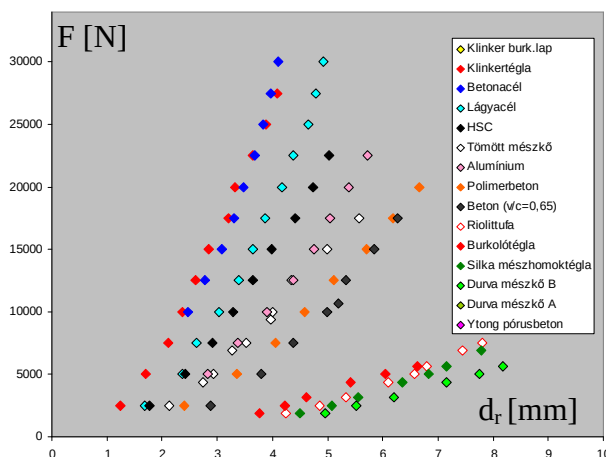
A kutatómunkám során az erő és a benyomódás átmérő közötti kapcsolatot vizsgáltam valamint kerestem egy az átmérő és a teher közötti pontos összefüggést. A 4.11, 4.12, 4.13 és 4.14 ábrák az általam vizsgált anyagokon mutatják be a terhelő és az átmérő viszonyát, a Brinell-prés segítségével végzett mérés, valamint a mélységérzékeny benyomódás vizsgálat (DSI) eredményei alapján.



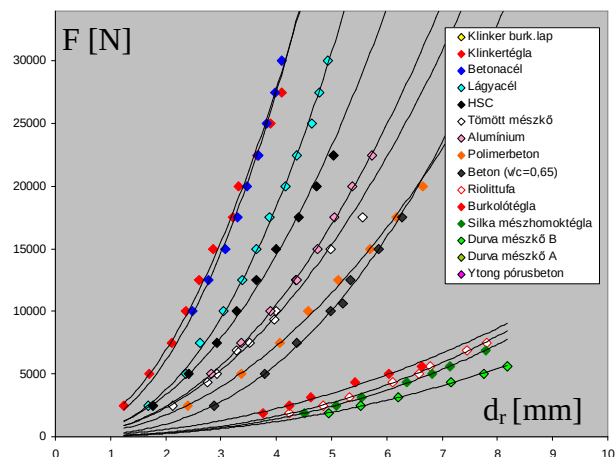
4.11 ábra: Maradó benyomódási átmérő és terhelőerő közötti kapcsolat DSI vizsgálatból



4.12 ábra: Maradó benyomódási átmérő és terhelőerő közötti kapcsolat DSI vizsgálatból



4.13 ábra: Maradó benyomódási átmérő és terhelőerő közötti kapcsolat Brinell-vizsgálatból

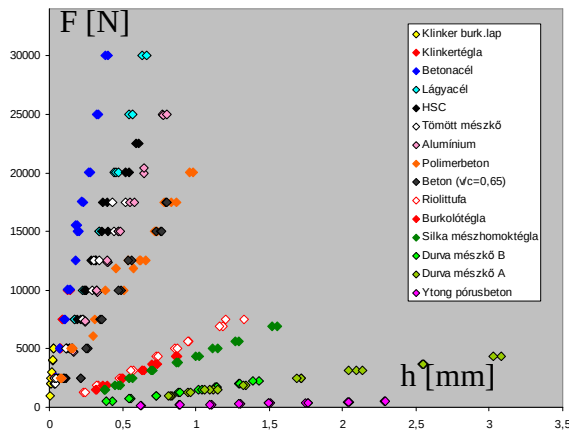


4.14 ábra: Maradó benyomódási átmérő és terhelőerő közötti kapcsolat Brinell-vizsgálatból

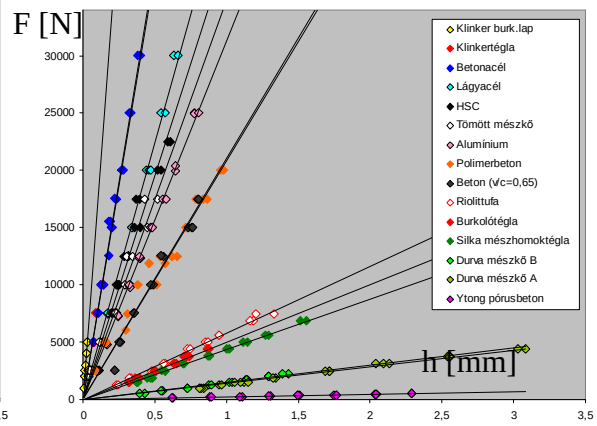
A 4.11, 4.12, 4.13 és 4.14 ábrákon látható ábrázolási mód a szakirodalomban is megjelenik. Az ábrákról leolvasható, hogy a terhelő erő (F), valamint a maradó benyomódás átmérője (d_r) között hatványfüggvény kapcsolat áll fenn.

$$F = k_1 \cdot d_r^n$$

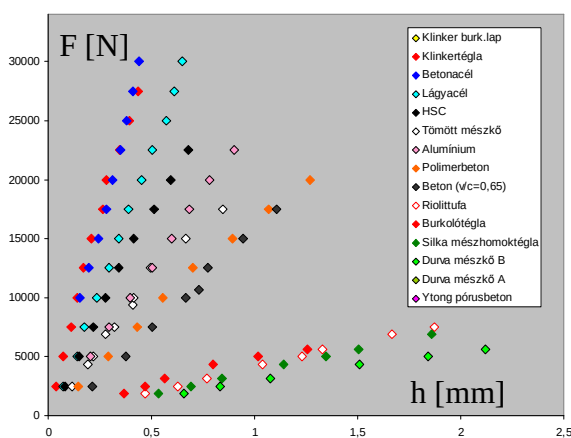
A témával foglalkozó kutatók, mint például Meyer, azonban nem ábrázolták a terhelő erőt (F) a benyomódási mélység (h) függvényében. Az adatok elemzése során én ezt az összehasonlítást is elvégeztem, a 4.15, 4.16, 4.17 és 4.18 ábrákon ezek eredménye látható.



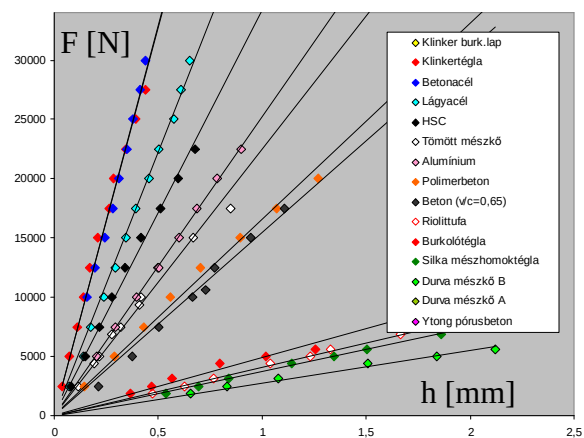
4.15 ábra: Benyomódási mélység és terhelőerő közötti kapcsolat DSI vizsgálatból



4.16 ábra: Benyomódási mélység és terhelőerő közötti kapcsolat DSI vizsgálatból



4.17 ábra: Benyomódási mélység és terhelőerő közötti kapcsolat Brinell-vizsgálatból



4.18 ábra: Benyomódási mélység és terhelőerő közötti kapcsolat Brinell-vizsgálatból

A függvényeken megfigyelhető, hogy minden általam vizsgált anyagra (egyaránt fémekre és porózus anyagokra is) a terhelő erő (F) és a benyomódási mélység (h) közötti kapcsolat lineáris.

$$F = k_2 \cdot h$$

E megállapítás alapján kijelenthető, hogy az F terhelőerő és a h benyomódási mélység közötti kapcsolatot kifejező k_2 tényező értéke anyagonként állandó. Eredményeim és az értékelés pontosságának igazolása érdekében a 4.2 táblázatban megjelenítettem a k_2 konstansok és az r^2 korrelációs tényezők értékeit, utóbbi a legrosszabb esetben is 0,937 felett marad. Az „A” jelű durva mészkőre, a klinker burkolólapra valamint az Ytong pórusbetonra a Brinell-vizsgálat nem volt végrehajtható az anyagok mechanikai tulajdonságai miatt.

4.2 táblázat: k_2 konstansok és r^2 korrelációs tényezők értékei $F=k_2 \cdot h$ összefüggés alapján ábrázolt függvényeken

Anyag	DSI		Brinell	
	k_2	r^2	k_2	r^2
Klinker burk.lap	168043	0,969	-	-
Klinkertégla	74535	0,941	65817	0,988
Betonacél	75838	0,991	65454	0,990
Lágyacél	44816	0,996	44471	0,995
HSC	39128	0,963	34192	0,994
Tömött mészkő	34909	0,962	22477	0,976
Alumínium	31325	0,997	25213	0,999
Polimerbeton	21059	0,959	16553	0,990
Beton (v/c=0,65)	20842	0,963	15455	0,986
Riolittufa	5832	0,992	4096	0,997
Burkolótégla	5019	0,994	4909	0,937
Silka mészhomoktégla	4391	0,995	3718	0,998
Durva mészkő A	1438	0,991	-	-
Durva mészkő B	1509	0,977	2765	0,984
Ytong pórusbeton	225	0,993	-	-

A 4.2 táblázat alapján kijelenthető, hogy a terhelőerő (F) és a benyomódási mélység (h) közötti kapcsolat lineáris.

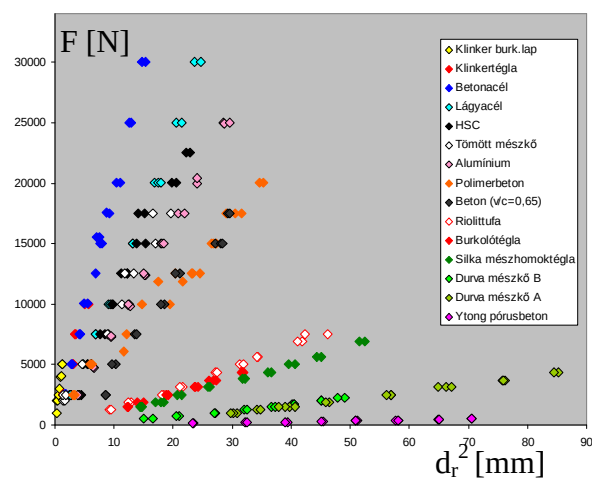
Mivel a golyó benyomódási mélysége (h) és a maradó golyóátmérő között négyzetgyökös összefüggés írható fel a 2.5 pontban leírtak alapján:

$$h = 0,5 \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)$$

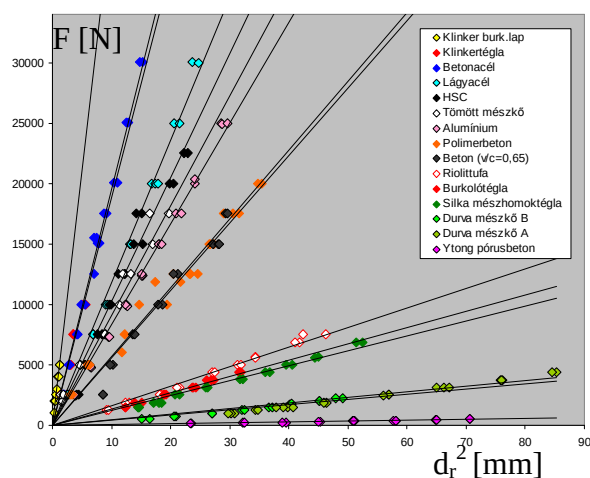
és

$$d = \sqrt{D^2 - (D - 2h)^2}$$

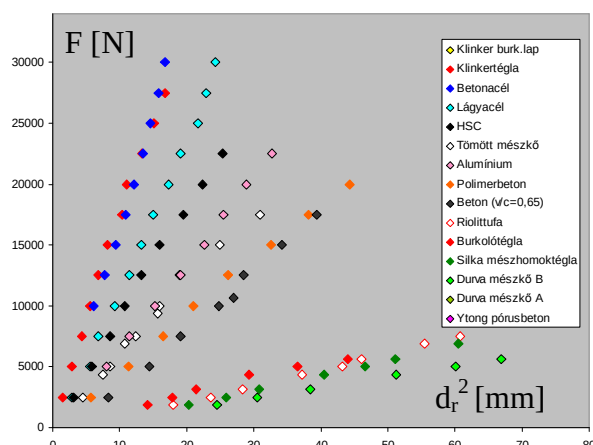
Ennek ismeretében felrajzoltam a terhelőerő (F) és a maradó benyomódási átmérő négyzete (d_r^2) közötti összefüggést. Ennek eredményét a 4.19, 4.20, 4.21 és 4.22 ábrák mutatják.



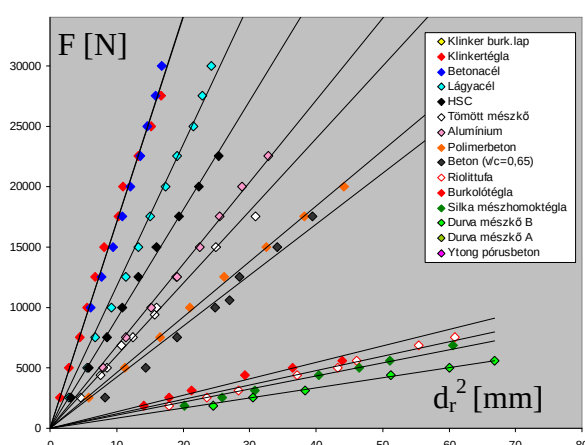
4.19 ábra: Maradó benyomódási átmérő négyzete és terhelőerő közötti kapcsolat DSI vizsgálatból



4.20 ábra: Maradó benyomódási átmérő négyzete és terhelőerő közötti kapcsolat DSI vizsgálatból



4.21 ábra: Maradó benyomódási átmérő négyzete és terhelőerő közötti kapcsolat Brinell-vizsgálatból



4.22 ábra: Maradó benyomódási átmérő négyzete és terhelőerő közötti kapcsolat Brinell-vizsgálatból

A 4.19, 4.20, 4.21 és 4.22 ábrákról leolvasható, hogy akár csak a terhelő erő (F) és a benyomódási mélység (h), a terhelő erő (F) és a maradó benyomódás átmérőjének négyzete (d_r^2) közötti kapcsolat is lineáris.

$$F = k_3 \cdot d_r^2$$

Ez várható volt a benyomódási mélység és a golyónyom átmérő közötti kapcsolat ismeretében. Eredményeim és következtetésem helyességének igazolására az alábbi táblázatban látható k_3 konstansok és r^2 korrelációs tényezők adatait mellékelem. Ebben az esetben a leggyengébb korrelációs tényező érték is 0,932 felett marad, amely a feltevés helyességét igazolja.

4.3 táblázat: k_3 konstansok és r^2 korrelációs tényezők értékei $F=k_3 \cdot d_r^2$ összefüggés alapján ábrázolt függvényeken

Anyag	DSI		Brinell	
	k	r^2	k	r^2
Klinker burk.lap	4211,9	0,969	-	-
Klinkertégla	1952,2	0,990	1703,5	0,992
Betonacél	1883,7	0,941	1696,4	0,985
Lágyacél	1180,2	0,992	1171,6	0,991
HSC	1024,9	0,965	902,8	0,997
Tömött mészkő	908,79	0,963	598,9	0,986
Alumínium	833,4	0,993	677,9	0,996
Polimerbeton	569,2	0,966	459,5	0,998
Beton (v/c=0,65)	557,7	0,957	421,9	0,973
Riolittufa	161,8	0,982	119,7	0,986
Burkolótégla	134,9	0,987	136,4	0,969
Silka mészhomoktégla	123,7	0,980	108,4	0,982
Durva mészkő A	45,9	0,932	-	-
Durva mészkő B	42,5	0,950	83,3	0,995
Ytong pórusbeton	6,8	0,988	-	-

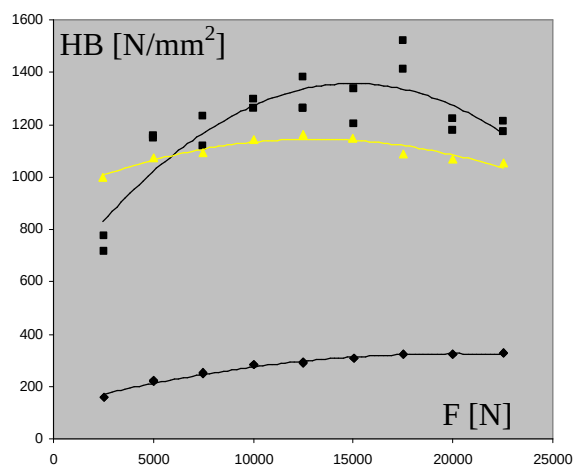
Ezek alapján levonhatók az alábbi következtetések:

- a Meyer-féle hatványtörvényben szereplő n kitevő értéke nem 2 körüli érték, hanem pontosan 2. Feltehető továbbá, hogy a Meyer (1908) által publikált eredmények is ezt az összefüggést mutatták, de a kornak megfelelő számítási módszerek és technológiai háttér nem voltak kellően pontosak ennek az összefüggésnek a kimutatására.
- a Meyer-féle hatványtörvényben szereplő a szorzótényező egy kizárólag az anyagtól függő érték, amely minden anyagra egyenként megadható.

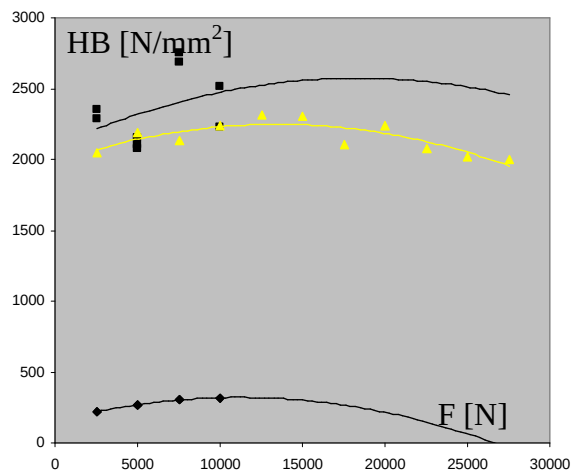
4.4 A Brinell-keménység a terhelőerő függvényében

A szakirodalom kimondja, hogy a betonok Brinell-keménysége függ a terhelőerő nagyságától, valamint, hogy létezik a Brinell-keménységnek egy maximum értéke, amely a terhelőerő vagy a benyomódás átmérőjének függvényében megadható (Szilágyi *et al*, 2011). Az eddigi kutatások eredményeit részletesen a 2.7 fejezetben fejtettem ki.

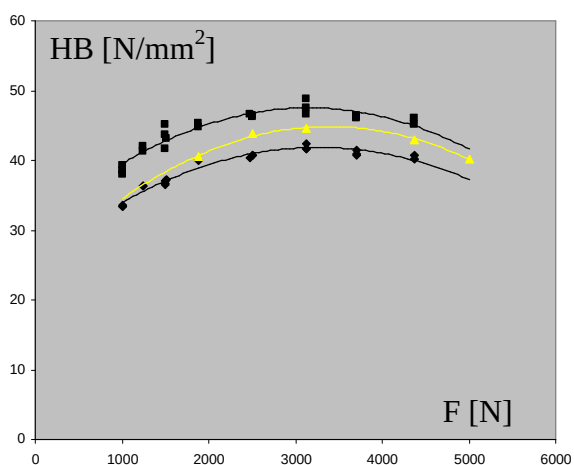
A dolgozatomban egyik témája e feltevés vizsgálata egyéb anyagokra. Vizsgálatom eredményei a 3.3.2-es fejezetben vannak grafikus és táblázatos formában feltüntetve. A pontosítás kedvéért néhány jellegzetes eredményt ebben a fejezetben is bemutatok.



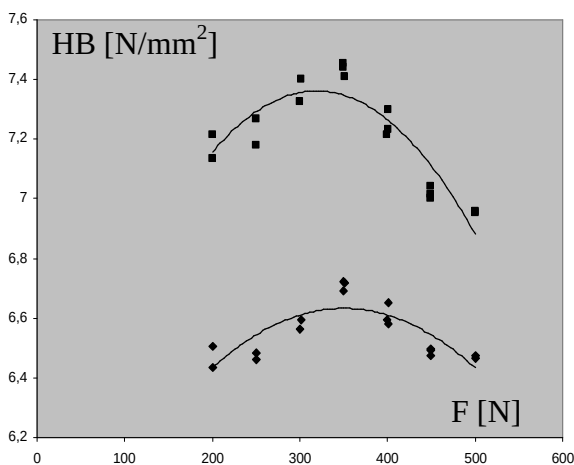
4.23 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell keménység (HB) összefüggése nagyszilárdságú betonra



4.24 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell keménység (HB) összefüggése klinker téglára



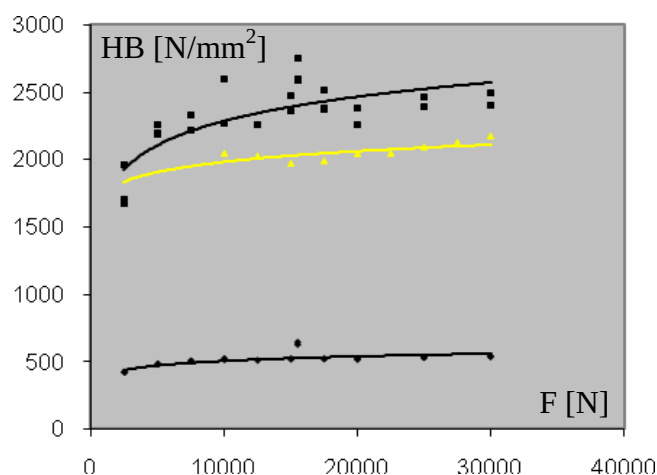
4.25 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell keménység (HB) összefüggése durva mészkőre



4.26 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell keménység (HB) összefüggése Ytong pórusbetonra

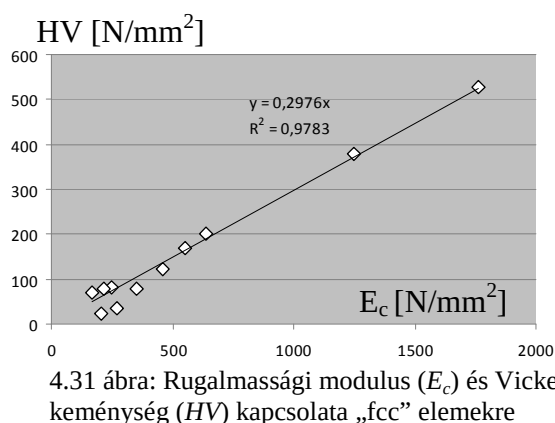
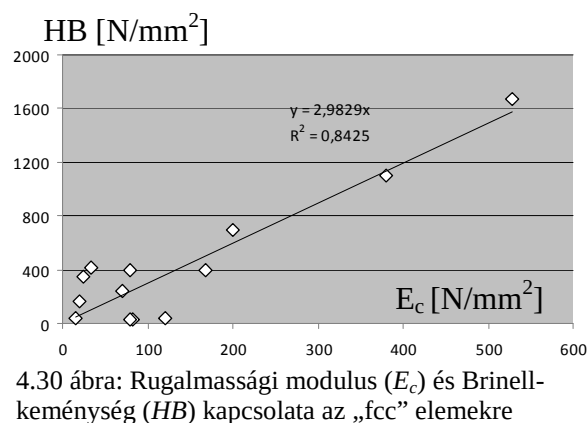
A 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 és a 3.3.2 fejezetbeli ábrák alapján megállapítható, hogy a megfigyelés valóban helyes betonok esetére. Ezen felül kijelenthető, hogy ez az jelenség megfigyelhető más porózus anyagok esetében is. Így megállapítható, hogy minden porózus anyag esetére létezik a Brinell-keménységnek egy olyan maximális értéke, amely a terhelőerő függvényében megadható. Erre magyarázatként szolgált a betonok és a vizsgált kőzetek hasonló porózus tulajdonsága. A porózus anyagok felületén lejátszódó folyamatok pontosabb elemzését kutatási munkám következő részének tekintem, ennek elemzése nem e dolgozat témája.

Tömör anyagok esetére is vizsgáltam a jelenséget, ezek eredményeit is a 3.3.2 fejezetben ismertettem, jelen fejezetben csak egy anyagot emelek ki reprezentatív példaként (4.27 ábra).



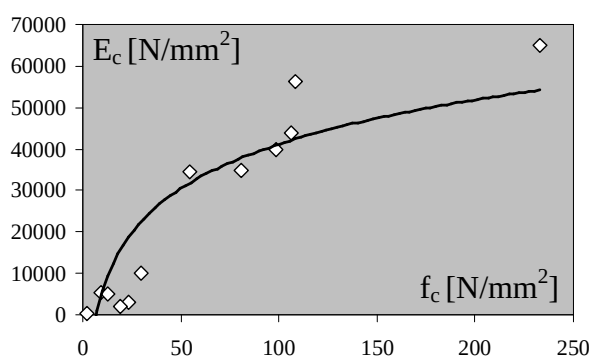
4.27 ábra: Terhelőerő (F) és Brinell-keménység (HB) összefüggése betonacélra

A 3.3.2 fejezet ábráiból megállapítható, hogy a feltevés homogén, nem porózus anyagok esetére – ahogyan a szakirodalom is leírja – nem igaz. Fémek esetében a terhelőerő növekedésével nő a Brinell-keménység, bár az megállapítható a függvények alakjának alaposabb vizsgálata után, hogy egy vízszintes érintőhöz tartanak az értékek. Ez a jelenség a fémek teher alatti felkeményedéséből következik. Ezeknek az adatoknak az ismeretében megállapítható, hogy a Brinell-keménység maximális értékére vonatkozó megfigyelés csak porózus anyagok esetében tehető meg, nulla porozitású anyagok esetén a terhelő erő nagyságának növekedésével arányosan nő a Brinell-keménység mérőszáma is egy bizonyos határig.



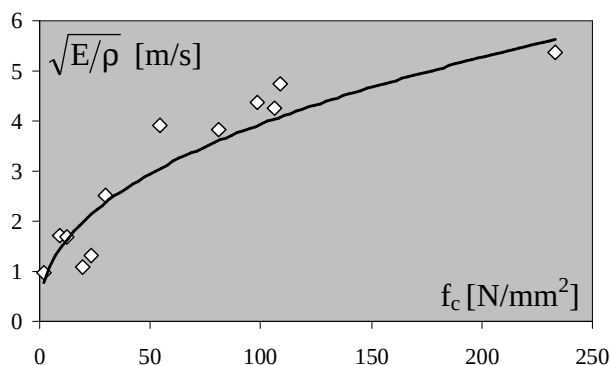
Jól látható, hogy mindkét függvény egyenlete egy egyenest ír le, ami arra utal, hogy az anyagok rugalmassági modulusa és keménysége között található kapcsolat.

Vizsgálati eredményeim ismertetését a szakirodalomban megtalálható összefüggések tanulmányozásával kezdem. A vizsgálatok adataiból először elkészítettem az anyagok rugalmassági modulus-nyomószilárdság összefüggését. A szakirodalomban fellelhető megfigyelést jól közelítő összefüggést kaptam én is a mérési adataim alapján, amelyet a 4.32 ábrán ábrázoltam.



Mivel az elvi ábra a szakirodalomban kizárólag betonokra vonatkozott, én pedig egyéb kőszzerű anyagokra illesztettem rá a görbét, így az elvi ábrától kis eltérés tapasztalható. De az ábra hasonlósága arra utal, hogy más, betonhoz hasonló porózus kőszzerű anyagoknál is létezik hasonló összefüggés. A vizsgálataim során azonban nem tanulmányoztam kellően sokféle anyagot (mindössze 12 típust) ahhoz, hogy ennek a kapcsolatnak a függvényét általános alakban is meg tudjam adni.

A témakörhöz tartozóan érdekességként megmutatom a szilárdság és a hang terjedési sebessége közötti összefüggést is, amely a rugalmassági modulus és a szilárdság közötti kapcsolathoz nagyon hasonló alakú görbét ír le.



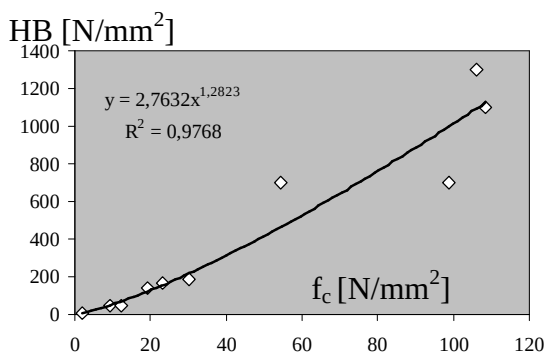
4.33 ábra: Nyomószilárdság (f_c) és hang terjedési sebessége ($\sqrt{E/\rho}$) kapcsolata

Homogén, izotróp, lineárisan rugalmas közegek esetén a hang terjedési sebessége felírható a következő alakban:

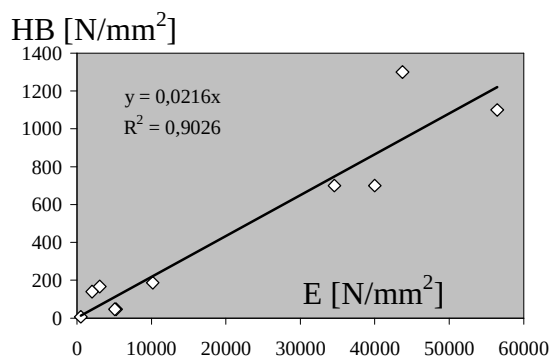
$$v_{\text{TERJEDÉSI}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}}$$

Ahol, E a rugalmassági modulus, ρ a vizsgált anyag sűrűsége, ν a Poisson-tényező. Az összefüggésben a Poisson-tényezőt tartalmazó tagot közelítőleg 1-nek vettem fel. Ennek a kapcsolatnak az elemzése nem szerepel ebben a TDK dolgozatomban.

A keménység és a nyomószilárdság valamint a rugalmassági modulus közötti kapcsolatot az általam mért eredményeken keresztül szeretném megmutatni. Ezek grafikus formában a 4.34 és a 4.35 ábrán láthatóak a rugalmas-képlékeny és képlékeny kőszzerű anyagokra együttesen megjelenítve.



4.34 ábra: Nyomószilárdság (f_c) és Brinell-keménység (HB) kapcsolata

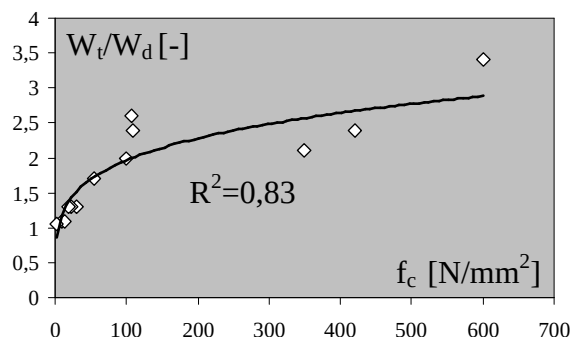


4.35 ábra: Rugalmassági modulus (E) és Brinell-keménység (HB) kapcsolata

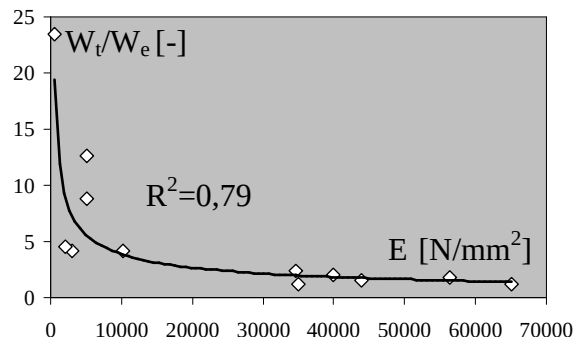
A 4.34 és 4.35 ábrákról egyértelmű kapcsolat olvasható le mindkét esetben, ennek belátására érdemes megtekinteni a korrelációs tényezők értékeit. Ezek az értékek egy ilyen különböző anyagokat vizsgáló mérés esetén nagyon pontosnak tekinthetők. Ezek alapján megerősíthető az a feltételezés, hogy a három anyagi jellemző között létezik kapcsolat. Ennek a kapcsolatnak a pontosabb megértését elősegítendő foglalkoztam a benyomódás közben befektetett energiával, amelynek eredményeit a következő fejezetben adom meg. A probléma pontos definiálása és az összefüggések mélyebb megértése túlmutat a TDK dolgozatomban célkitűzéseim.

4.6 A keménységmérés energiaelvű megközelítése

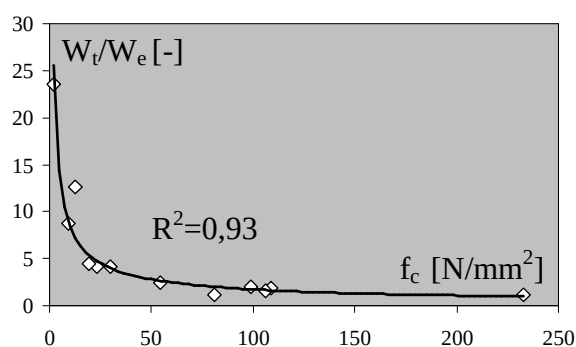
Jelen fejezetben a rugalmas, a disszipálódott valamint a teljes energia függvényében vizsgálom a különböző anyagjellemzőket, elsősorban a szilárdságot és a rugalmassági moduluszt. A vizsgálati eredményeimet ennek megfelelően ábrázoltam.



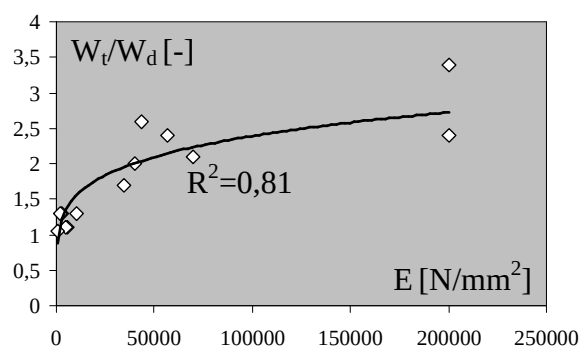
4.36 ábra: Nyomószilárdság (f_c) és a teljes (W_t) és a disszipálódott (W_d) energia arányának kapcsolata



4.37 ábra: Rugalmassági modulus (E) és a teljes (W_t) és a rugalmas (W_e) energia arányának kapcsolata



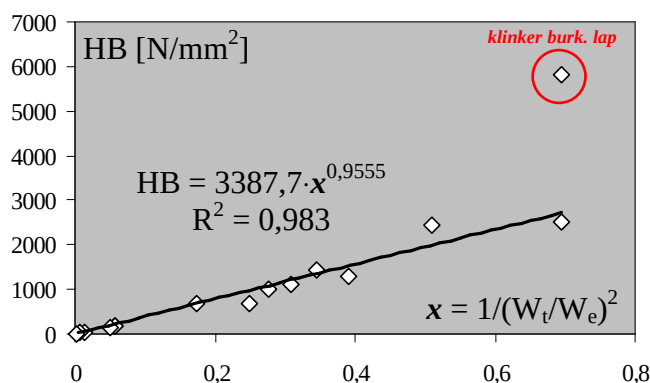
4.38 ábra: Nyomószilárdság (f_c) és a teljes (W_t) és a rugalmas (W_e) energia arányának kapcsolata



4.39 ábra: Rugalmassági modulus (E) és a teljes (W_t) és a disszipálódott (W_d) energia arányának kapcsolata

Ha megvizsgáljuk a 4.36, 4.37, 4.38 és 4.39 ábrákat megállapítható, hogy mind a rugalmas, mind a disszipálódott energia kapcsolata a két szilárdságjellemzővel azonos típusú hatványfüggvénnyel írható le. A korrelációs tényezőt figyelembe véve megállapítható, hogy megfelelő pontossággal csak a rugalmas energia és a nyomószilárdság közötti összefüggés adható meg, a többi érték az esetleges mérési hibák következményeként nem ad megbízható eredményt. Az energiaelvű megközelítés alapján megfigyelhető, hogy az anyagok Brinell-keménysége látszólag a rugalmas jellemzőivel van inkább kapcsolatban. A képlékeny jellemzőkkel való összefüggés csak feltételezhető.

A 4.40 ábrán a Brinell-keménység látható a teljes és a rugalmas energia aránya négyzetének függvényében.



4.40 ábra: A teljes (W_t) és a rugalmas (W_e) energia arányának valamint a Brinell-keménység (HB) kapcsolata

A Brinell-keménység a rugalmas-, és teljes benyomódási energia arányának függvényében ilyen módon felírva erős összefüggést mutat a két jellemző között. Az összefüggés képlet formájában a következő módon adható meg:

$$HB = k \times \frac{1}{\left(\frac{W_t}{W_e}\right)^2}$$

ahol

- HB a vizsgált anyag Brinell-keménysége
- W_t a teljes benyomódási energia értéke
- W_e a rugalmas benyomódási energia nagysága

A fenti megfigyelések arra utalnak, hogy egy anyag Brinell-keménysége és a rugalmas benyomódási munka között közvetlen kapcsolat írható fel. Az összefüggés vizsgálataim szerint elsősorban rugalmas-képlékeny és tökéletesen képlékeny anyagokra igaz (4.40 ábra). A csaknem ideálisan rugalmas viselkedésű klinker burkolólap vizsgálati eredménye a 4.40 ábra trendvonalára nem illeszkedik (a trendvonal egyenletének meghatározása során ezt az értéket nem is vettem figyelembe). A feltételezés így csak bizonyos értelmezési tartományra szűkítve tehető meg. E kérdéskör további részletes tanulmányozása túlmutat TDK dolgozatom célkitűzésein.

5. Összefoglalás

A felületi keménységmérést már évszázadok óta használja a gyakorlat, napjainkban a keménységmérés célja általában a minta szilárdsági tulajdonságainak becslése. Hozzá kell tenni, hogy a keménységmérési eredmények általában jelentős szórással rendelkeznek. A legjelentősebb képlékeny deformációt a statikus keménységmérés eredményezi, így a szilárdsággal feltételezhetően erős a kapcsolata; ezért választottam ezt a módszert a mintáim vizsgálatára. Statikus keménységmérő eljárások esetében a keménységi mérőszám a képlékeny benyomódás nagyságából határozható meg. Irodalomkutatási munkám során megfigyeltem, hogy ez a módszer elsősorban fémek vizsgálatára elterjedt, azonban alkalmas porózus anyagok vizsgálatára is.

Kutatómunkám során egyaránt vizsgáltam porózus anyagokat és fémeket az egyik legelterjedtebb keménységmérő eszköz, a Brinell-prés segítségével. A vizsgálatokhoz 10 mm átmérőjű, nagy szilárdságú acélból készült, golyó alakú alaktestet használtam. A vizsgálataim során össze kívántam hasonlítani a Brinell-féle keménységmérés eredményeit a mélységérzékeny benyomódás (Depth Sensing Indentation, DSI) vizsgálatból kapható adatokkal, ezért DSI vizsgálatokat is végeztem ugyanannak az alaktestnek a felhasználásával.

Kutatómunkám során 15 különféle anyagot vizsgáltam, célom elsődlegesen a porózus, kőszerű anyagok tanulmányozása volt, amelyet kiegészítettem fémek vizsgálatával is. A vizsgált anyagokat mechanikai tulajdonságaik szerint csoportokba soroltam, amelyek a következők voltak: *fémek* (alumínium, lágyacél, betonacél), *kerámiák* (klinker burkolólap, klinkertégla, burkolótégla), *kőzetek* (kétféle durva mészkő, tömött mészkő, riolittufa), *egyéb kőszerű anyagok* (Silka mészhomoktégla, Ytong pórusbeton), *betonok* (nagy szilárdságú beton (HSC), normál szilárdságú, 0,65 víz-cement tényezőjű beton, polimerbeton).

Vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy a Brinell-vizsgálatok és a DSI vizsgálatok közel azonos eredményre vezetnek a terhelőerő – maradó benyomódás átmérő ($F - d_r$) kapcsolat tekintetében.

A DSI kísérleti eredményeimből megállapítottam, hogy a maradó benyomódás átmérő (d_r) és a maximális benyomódás átmérő (d_m) között lineáris kapcsolat áll fenn a képlékenyen, illetve a rugalmas-képlékenyen viselkedő anyagok esetén. Ez az arány anyagjellemzőként fogható fel, így minden anyagra egyenként megadható érték.

A vizsgálati adatpontokra meghatároztam a Meyer-törvényeket, vizsgáltam a terhelő erő (F) és a benyomódás átmérője (d_m és d_r), illetve a terhelőerő (F) és a maradó benyomódási mélység (h_r) közötti összefüggést. A benyomódási mélység és a benyomódási átmérő közötti, a szakirodalomban fellelhető összefüggés négyzetgyökös alakja miatt vizsgáltam a terhelő erő (F) és benyomódási átmérő négyzete (d_r^2) közötti összefüggést, amely kapcsolat egyértelműen lineárisra adódott. A megfigyelések alapján kijelenthető, hogy a Meyer-törvényben szereplő n kitevő értéke pontosan 2. Az eddig a szakirodalomban fellelhető adatok is 2 körüli kitevő értékről számoltak be, azonban a kitevő pontos értékét korábban nem igazolták több anyagra kiterjedően.

A terhelő erő és a Brinell-keménység közötti összefüggést is vizsgáltam mind a 15 anyagra vonatkozóan. A vizsgálati eredményekből megfigyelhető volt az a szakirodalomban a közelmúltban publikált feltételezés, hogy betonokra a Brinell-keménység a terhelő erő függvényében ábrázolva maximális értéket vesz fel attól függően, hogy az alkalmazott erő még tömörödést idéz-e elő az anyagban, vagy már fellazulás alakul ki a Hertz-féle repedések megjelenése miatt (Szilágyi *et al*, 2011). Ezt a feltevést alátámasztották az én vizsgálati eredményeim is, azonban ez a jelenség nem csak a betonokra volt megfigyelhető, hanem minden egyéb porózus anyagra is. Fémeknél a jelenség

– összhangban a szakirodalmi megfigyelésekkel – vizsgálataim során nem volt látható. Porózus, kőszerű anyagokra vonatkozó vizsgálati eredményeim alapján megerősíthető, hogy az idézett szakirodalmi feltételezés a tömörödő-fellazuló tönkremeneteli mechanizmussal hozható kapcsolatba. Ennek mélyebb megértése jövőbeni kutatás tárgyát kell, hogy képezze.

A később tisztázandó kérdések ellenére vizsgálataim eredményeként nagyon erős korrelációval találtam kapcsolatot mind a Brinell-keménység és a nyomószilárdság, mind pedig a Brinell-keménység és a rugalmassági modulus között, a kőszerű porózus anyagokra vonatkozóan (ld. 4.34 és 4.35 ábra). Eredményeim ezzel megerősítik a jövőbeni, részletesebb kutatások igényét.

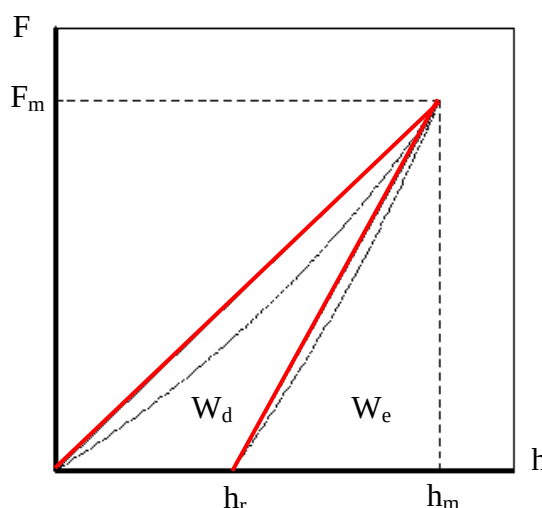
Az anyagok keménységi és szilárdsági jellemzői kapcsolatba hozhatóak egyéb, energia elven megfogalmazott jellemzőikkel is. Kutatásaimban kapcsolatot igyekeztem találni a benyomódási munka (teljes, rugalmas, illetve disszipálódó benyomódási munka) és a mechanikai jellemzők között. Ezzel igyekeztem lépéseket tenni a keménység, mint fizikai jellemző pontosabb megértése felé, mivel a mai napig nem tisztázott a szakirodalomban, hogy a keménységi mérőszámok milyen jellegű mechanikai jellemzőt mutatnak meg *leginkább*. Logikai alapon a rugalmas benyomódási munka az anyag rugalmassági modulusával, míg a disszipálódó benyomódási munka az anyag szilárdságával lenne kapcsolatba hozható. Vizsgálati eredményeim ezt a feltételezést nem támasztották alá elég erősen. Az energiaelvű megközelítés alapján azt figyeltem meg, hogy az anyagok Brinell-keménysége látszólag a rugalmas jellemzőivel van inkább kapcsolatban. A képlékeny jellemzőkkel való összefüggés inkább csak feltételezhető. E kérdéskör további részletes tanulmányozása túlmutat TDK dolgozatom célkitűzésein.

Összefoglalásként tehát megállapítható, hogy TDK dolgozatom célkitűzéseit (ld. 1.2 fejezet) sikerült maradéktalanul elérnem. Különbőféle anyagokon összehasonlítottam a Brinell-féle keménységmérés eredményeit a mélységérzékeny benyomódás (Depth Sensing Indentation, DSI) vizsgálatból kapható adatokkal. Erős korrelációjú összefüggéseket találtam különféle anyagok Brinell-keménysége és mechanikai jellemzőik között. Részletesen tanulmányoztam a Meyer-féle hatványfüggvényeket, és sikerült megállapítanom, hogy a hatványkitevő értéke bármely anyagra vonatkozóan $n = 2$ értékű. Végül kiterjesztettem Szilágyi *et al* (2011) betonokra vonatkozó szakirodalmi feltételezését más, a betontól eltérő porózus kőszerű anyagokra a Brinell-keménység maximális értékének létezését illetően.

6. Jövőbeni kutatás

Jövőbeni kutatásom témái elsősorban a TDK dolgozatomba bővebben bele nem férő részek kidolgozása, a felvetődött problémák pontosabb megértése és vizsgálata. Legfontosabb további kutatási területem ennek a dolgozatnak is elsődleges témájául szolgáló kapcsolat megértése a keménység és egyéb szilárdsági jellemzők között. A témakör teljesebb átlátásához további vizsgálatokra, valamint a jelenlegi és az új eredmények értékelésére lesz szükség. Szintén feldolgozásra várnak azok a vizsgálati eredményeim, amelyeket a TDK dolgozatomhoz felhasznált 15 anyag dinamikus keménységmérő műszerekkel (Schmidt-kalapács és Leeb-készülék) folytatott vizsgálata során kaptam, és terjedelmi, illetve időbeli korlátok miatt jelen munkámba nem kerültek bele.

További feladatommak tekintem, hogy kutatásaim jövőbeni eredményeként, egyszerűsítések bevezetésén keresztül, a gyakorlat számára is használható formulákat találjak. Erre azt követően látok lehetőséget, hogy az energiaelvű megfontolásokat tisztáztam. Például a TDK kutatásomban észlelt, a képlékenyen, illetve rugalmas-képlékenyen viselkedő anyagok esetén fennálló lineáris kapcsolat a maradó benyomódás átmérő (d_r) és a maximális benyomódás átmérő (d_m) között alapját képezheti jövőbeni egyszerűsítések bevezetésének. Ha emellett még a terhelőerő – benyomódási mélység (F - h) függvénykapcsolatban is lineáris egyszerűsítéseket vezetünk be (6.1 ábra), azzal a feladat tovább egyszerűsíthető.



6.1 ábra: A terhelőerő (F) benyomódási mélység (h) kapcsolat egyszerűsítési lehetőségei (elvi ábra)

7. Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Szilágyi Katalinnak és Dr. Borosnyói Adorjának, hogy biztosították a vizsgálatokhoz szükséges berendezéseket valamint az irodalomkutatáshoz szükséges anyagot és a dolgozat elkészítésében nyújtott további segítségüket.

Köszönöm Hatala Márknak a Polimertechnika Tanszéken végzett vizsgálatokban nyújtott segítségét.

8. Felhasznált irodalom

- Balázs, Gy. (1983) „Építőanyagok és kémia”, *Tankönyvkiadó*, 1983, 656 p.
- Barba, A. A. (1640) „Arte de los metales”, *Reprint*, Lima, 1817
- Brinell, J.-A. (1901) „Mémoire sur les épreuves á bille en acier”, *Communications présentés devant le congrés international des méthodes d’essai des matériaux de construction*, Vol. 2., 1901, pp. 83-94.
- Chandler, H. (1999) „Hardness testing”, *ASM International*, 1999, 192 p.
- Crepps, R. B., Mills, R. E. (1923) „Ball Test Applied to Cement Mortar and Concrete”, *Bulletin No. 12.*, Engineering Experiment Station, Purdue University, LaFayette, Indiana, May 1923, 32 p.
- Dutron, R. (1927) „Essais à la bille pour la détermination de la résistance à la compression des pâtes de ciment pur”, *Brochure*, Le laboratoire Groupement Professionnel des Fabricants de Ciment Portland artificiel de Belgique. Bruxelles, Belgium, 1927.
- Fischer-Cripps, A. (2000) „Introduction to Contact Mechanics” Mechanical Engineering Series, *Springer*, 2000, 221 p.
- Gaede, K. (1934) „Ein neues Verfahren zur Festigkeitsprüfung des Betons im Bauwerk”, *Bauingenieur*, 1934/15, Vol. 35-36., pp. 356-357.
- Gaede, K. (1952) „Die Kugelschlagprüfung von Beton”, *Deutschen Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 107, Ernst & Sohn, Berlin, 73 p.
- Gillemot L. (1967) „Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat”, *Tankönyvkiadó*, 1967, 429 p.
- Hertz, H. (1881) „Über die Berührung fester elastischer Körper“, *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 1881/5, p. 12-23.
- Johnson, K. L. (1985) „Contact mechanics”, *Cambridge University Press*, 1985, 452 p.
- Kaliszky, S., Kurutzné Kovács, M., Szilágyi, Gy.(2006) „Szilárdságtan”, *Nemzeti Tankönyvkiadó*, 504 p.
- Kecskés, B. (2010) „Keménységmérés”, *Kézirat*, Kecskeméti Főiskola, 2010, 17 p.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2005) „Concrete: Microstructure, Properties, and Materials”, *McGraw Hill*, 2006, 659 p.
- Meyer, E. (1908) „Untersuchungen über Härteprüfung und Härte”, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 52, No. 17, April 1908, pp. 645–654, 740–748, 835–844.
- Mindess, S., Young, J. F. (1981) „Concrete”, *Prentice-Hall*, 1981, 671 p.
- Mohs, F. (1812) „Versuch einer Elementar-Methode zur Naturhistorischen Bestimmung und Erkennung von Fossilien”, *University of Graz*, 1812

Neville, A. M. (1995) „Properties of concrete”, *John Wiley & Sons*, 1996, 844 p.

Palotás, L. (1979) „Általános anyagismeret”, Mérnöki szerkezetek anyagtana 1., *Akadémiai Kiadó*, Budapest, 1979, 664 p.

Réaumur, R. A. F. (1722) „L’art de convertir le fer forgé en acier”, *French Academy of Sciences*, Paris, 1722

Sestini, Q. (1934) „La prova Brinell applicata al materiali cementizi come prova di resistenza”, *Le Strade*, 1934/7, Vol. 16. pp. 255-264.

Sneddon, I. N., (1965) „The Relation between Load and Penetration in the Axisymmetric Boussinesq Problem for a Punch of Arbitrary Profile”, *International Journal of Engineering Science*, Volume 3, Issue 1, May 1965, pp. 47-57.

Steinwede, K. (1937) „Über die Anwendung des Kugelhärteversuches zur Bestimmung der Festigkeit des Betons”, Doctoral Thesis, University of Hannover, Faculty of Civil Engineering. 20 Feb 1937, *Gebrüder Jänecke*, Hannover, 69 p.

Szilágyi K., Borosnyói A. (2008) „A Schmidt-kalapácsos vizsgálatok 50 éve: Múlt, jelen, jövő”, *Vasbetonépítés*, X. évf. 1. szám, 2008/1, pp. 10-17.; 2. szám, 2008/2, pp. 48-54.; 3. szám, 2008/3, pp. 73-82.

Szilágyi, K., Borosnyói, A., Dobó, K., (2011) „Static indentation hardness testing of concrete: A long established method revived”, *Építőanyag*, Volume 63, Issue 1-2, 2011, pp. 2-8.

Tabor, D. (1947) „A simple theory of static and dynamic hardness”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Volume 192, Issue 1029, pp. 247-274

Tabor, D. (1951) „The hardness of metals”, *Oxford University Press*, 1951, 175 p.

Tabor, D. (1977) „Surface forces and surface interactions”, *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 58, Issue 1, January 1977, pp. 2-13.

Timoshenko, S. P. (1953) „History of strength of materials – With a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures”, *McGraw Hill*, 1953, 452 p.

Vandone, I. (1933) „La prova d’impronta per determinare la resistenza a compressione dei cementi”, *Le Strade*, 1933/9, Vol. 15., pp. 381-389.

Varga, F., Tóth, L., Pluvinau, G. (1999) „Anyagok károsodása és vizsgálata különböző üzemi körülmények között – Keménységmérés”, *Miskolci Egyetem*, 35 p.