



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI
EGYETEM

Építőmérnöki kar

Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék

Betontechnológiai paraméterek és környezeti tényezők hatása a beton felületi keménységére

Országos Tudományos Diákköri Dolgozat

Mikó Tamás

III. éves BSc építőmérnök hallgató

Konzulensek:

Dr. Borosnyói Adorján
egyetemi docens

Szilágyi Katalin
doktorjelölt

Budapest, 2015

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	3. oldal
2.	Célkitűzések.....	3. oldal
3.	Kutatási módszerek.....	4. oldal
4.	Szakirodalmi áttekintés.....	4. oldal
	4.1 A beton felületi keménysége	4. oldal
	4.2 A beton nyomószilárdsága	5. oldal
	4.2.1 A tömörítés hatása.....	6. oldal
	4.2.2 Az utókezelés hatása	7. oldal
	4.3 A karbonátosodás	8. oldal
	4.4 A Schmidt-kalapácsos vizsgálat.....	10. oldal
	4.4.1 Az eszköz elődei	10. oldal
	4.4.2 Működési elv.....	12. oldal
	4.4.3 A Schmidt-kalapács típusai	13. oldal
	4.4.4 A vizsgálat feltételei.....	14. oldal
	4.4.5 Befolyásoló tényezők.....	15. oldal
	4.4.6 A mérés ismétlésszáma.....	16. oldal
	4.5 A visszapattanási érték és a nyomószilárdság összefüggése	17. oldal
	4.6 A szilárdságbecslés megbízhatóságának javítása	18. oldal
	4.7 Szabványosítás.....	19. oldal
	4.7.1 Európai javaslat.....	19. oldal
	4.7.2 Hazai javaslatok	20. oldal
	4.7.2.1 Tapasztalati paraméterek használta az értéke-	
	lés során.....	20. oldal
	4.7.2.2 Roknich György javaslata	21. oldal
	4.7.2.3 Borján József javaslata.....	22. oldal
	4.8 Statisztikai alapok	24. oldal
	4.8.1 Statisztikai jellemzők	24. oldal
	4.8.2 Metrológiai fogalmak	28. oldal
	4.8.3 Isméltelhetőségi feltételek.....	29. oldal

5. Saját vizsgálatok	30. oldal
5.1 Bevezetés	30. oldal
5.2 Kutatási terv	30. oldal
5.2.1 Első kísérletsorozat	30. oldal
5.2.2 Második kísérletsorozat	31. oldal
5.2.3 Harmadik kísérletsorozat	31. oldal
5.3 Vizsgálati módszerek.....	31. oldal
5.3.1 A Schmidt-kalapácsos vizsgálat	31. oldal
5.3.2 A nyomószilárdság vizsgálat	32. oldal
5.3.3 A karbonátosodási mélység vizsgálata.....	32. oldal
6. Eredmények és értékelésük	33. oldal
6.1 Karbonátosodás mélységének vizsgálata.....	35. oldal
6.2 Visszapattanási értékek statisztikai jellemzői	44. oldal
6.3 Tömörítés és utókezelés hatása a visszapattanási értékekre	45. oldal
6.4 Betonfelület nedvességtartalmának hatása a visszapattanási értékekre	49. oldal
6.5 Összehasonlíthatósági vizsgálatok	50. oldal
6.6 Különböző kialakítású Schmidt-kalapácsok megbízhatóságának összeha- sonlítása	52. oldal
7. Összefoglalás	54. oldal
8. Jövőbeli kutatás.....	56. oldal
9. Köszönetnyilvánítás.....	56. oldal
10. Felhasznált irodalom.....	57. oldal
11. Melléklet	

1. Bevezetés

A szerkezetek reális állapotának, maradék élettartalmának megítélése a korszerű, gazdaságos és biztonságos üzemeltetés alapköve. Fontos ismernünk a szerkezetek pillanatnyi állapotát, mert ebből megbecsülhetjük várható élettartamukat; láthatjuk, hogy alkalmasak-e még a feladatokra és kivédhetjük a lehetségesen kialakuló szerkezeti károkat, továbbá odafigyelhetünk a szerkezetek biztonságos mivoltára, ha időben észrevevesszük a problémákat. Erre a célra irányuló mérések egyike a keménységmérés.

A keménységmérés egy több évszázados múltra visszatekintő szilárdságbecslő, roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer. Roncsolásmentes vizsgálatoknak nevezzük mindazokat a módszereket, amelyek alkalmazása során a szerkezet anyaga nem károsodik és a vizsgálatot követően minőségromlás nélkül ellátja rendeltetésszerű feladatát. A roncsolásmentes anyagvizsgálatok előnye, hogy korlátlan számban ismételhetők.

Ilyen roncsolásmentes vizsgálati eszköz a Schmidt-kalapács. A legnagyobb előnye a gyors és könnyen elvégezhető mérés. Kis, kb. 1 kilogrammos tömegénél fogva helyszíni vizsgálatokhoz is tökéletes, nem igényel laboratóriumi körülményeket. TDK dolgozatom a Schmidt-kalapács köré épül fel: bemutatom a fejlődését, szerkezeti felépítését és működését, a használatára vonatkozó szabványokat és a teljesség igénye nélkül a méréseket befolyásoló tényezőket. Ezt követően ismertetem a laboratóriumi vizsgálataim kutatási tervét és módszereit, majd eredményeimet. Dolgozatom a jövőbeni kutatási lehetőségek összegzésével zárul.

2. Célkitűzések

A dolgozathoz kapcsolódó irodalomkutatás során felismertem, hogy a Schmidt-kalapács által kijelzett visszapattanási értéket olyan sok különböző hatás befolyásolja, hogy teljes részletességre kiterjedő kutatómunka elvégzése a TDK kutatásom jelenlegi fázisában nem lehetséges.

Kiválasztottam ezért olyan befolyásoló tényezőket, amelyekre vonatkozóan a szakirodalmi megfigyelések hiányosak vagy ellentmondásosak. A vizsgálati eredményeim értékelése során igyekeztem a mért adatok statisztikai jellemzői közötti összefüggéseket is vizsgálni.

Célkitűzéseim a következők voltak:

- Különböző típusú Schmidt-kalapácsok (N-típusú, L-típusú, Silver N-típusú) visszapattanási értékeire vonatkozó statisztikai elemzés.
- A Schmidt-kalapácsot működtető operátor mérési hibája hatásának statisztikai elemzése.
- Valós körülmények hatásának modellezése eltérő karbonátosodási mélységgel rendelkező, idős betonok, illetve eltérő felületi nedvességtartalmú betonok vizsgálatával.
- A tömörítés és az utókezelés hatásának vizsgálata a visszapattanási értékre.

3. Kutatási módszerek

A TDK dolgozatom előkészítéséhez áttanulmányoztam a szakirodalmat. Ebben nagy segítséget kaptam témavezetőimtől, akik több éves könyvtári kutatómunkával összegyűjtötték a terület szakirodalmát és a rendelkezésemre bocsátották. A szakirodalomban látható, hogy egyes kérdéseket, pl. a Schmidt-kalapácsos visszapattanási értékek átlaga és az átlagos nyomószilárdság közötti kapcsolatra vonatkozó összefüggéseket nagyon sokan, különböző betonokon, azonban kevésbé elmélyült kutatással nagyon sok cikkben, könyvfejezetben, tudományos dolgozatban tárgyalták, míg más kérdések, pl. a mért értékeket befolyásoló egyes hatások, az eredmények statisztikai jellemzőinek jellegzetességei, vagy az egyik legfontosabb, a karbonátosodási mélység hatása, sokkal kisebb figyelmet kap a szakirodalomban. A dolgozat következő fejezetében összefoglalom az irodalomkutatásom jelentősebb megfigyeléseit.

A TDK kutatásom második lépéseként kidolgoztam egy laboratóriumi kutatási tervet, amelyben olyan vizsgálatok elvégzését tűztem ki célként, amely a rendelkezésemre álló kb. egy év alatt meg is valósítható. A részletes kísérleti tervet, a felhasznált anyagokat és a vizsgálati módszereket dolgozatom későbbi fejezeteiben részletesen leírom.

A kísérletsorozatokból kapott összes mérést és mérésekből kapott eredményeket számítógépre vittem a könnyebb és gyorsabb adatelemzés, adat összehasonlítás érdekében és a biztonságosabb tárolás érdekében. A laboratóriumi vizsgálatok lezárását követően hatalmas mennyiségű numerikus adattal rendelkeztem, amelyeket táblázatkezelő szoftverrel, diagramok készítésével, illetve speciális matematikai statisztikai szoftverrel értékeltem ki. Ezeket az eredményeket szintén részletesen bemutatom dolgozatom későbbi fejezeteiben, illetve a dolgozat mellékletében megadom a numerikus adatokat táblázatos formában.

4. A szakirodalom áttekintése

4.1 A beton felületi keménysége [1,9,10,11]

A *keménység* anyagi tulajdonság, amely azt fejezi ki, hogy az anyag mennyire szilárd, milyen mértékben áll ellen a külső mechanikai behatásokkal szemben. Arányban áll a rugalmassággal, a szilárdsággal, a kopásállósággal, továbbá fordítottan arányos a képlékenységgel, szívósággal és csillapítóképeséssel.

A *felületi keménység* az anyag ellenálló képessége idegen test behatolásával szemben. Pontosabban nem lehet definiálni, ebből eredően többféle vizsgálati módszert találunk rá.

A keménység mérése már a szisztematikus anyagvizsgálat előtt megjelent a műszaki tudományban. Réaumur, francia természettudós volt az első, aki az anyagok szilárdságbecslésének céljára megalkotta mind a karcolási keménység, mind a szűrőkeménység fogalmát és lefektette a vizsgálat alapelveit. 1768-ban Kivist nyolc ásvány használatával javasolt egy karcolási skálát. Napjainkban karcolási keménység megállapításának legelterjedtebb módja a Mohs-féle ásványi alapskála használata, amely Carl Friedrich Cristian Mohsról, osztrák mineralógus és fizikusról lett elnevezve. Ez a módszer már kellően érzékeny

eljárás az anyag keménységének megállapítására és a terepi, előzetes bemérést is lehetővé teszi. Lényege, hogy minden nagyobb sorszámú ásvány karcolja az előtte álló, nála kisebb sorszámúakat. Két fokozat közé eső keménységet törtszámmal jelölik. A *Mohs-féle skála* tíz ásványa:

1. talk (körömmel könnyen karcolható)
2. gipsz (körömmel nehezen karcolható)
3. kalcit (körömmel nem karcolható, tűvel igen)
4. fluorit (tűvel nehezen, késsel könnyen karcolható)
5. apatit (tűvel nem, késsel nehezen karcolható)
6. földpát (késsel nem karcolható, reszelő fogja)
7. kvarc (üveget karcolja, acéllal szikrázik)
8. topáz (üveget karcolja)
9. korund (üveget karcolja)
10. gyémánt (üveget karcolja, legkeményebb valamennyi ásvány közül)

Fontos megjegyezni, hogy mást jelent a keménység a különböző szakterületek számára, például egy geológusnak karcolással szembeni ellenállást, a fémiparban deformációval szembeni ellenállást, míg egy építőmérnök számára elsősorban behatolással szembeni ellenállást jelent. Az építőipari anyagvizsgálatban a felületi keménységet alapvetően két elv alapján szokás mérni: vagy a rugalmas visszapattnás elvén, más néven dinamikus módszer, vagy pedig a képlékeny benyomódás mértékének vizsgálatával, azaz statikus módszerrel. A kialakult módszerek többnyire jól használhatók, de a keménységi mérőszámok közötti kapcsolat sok esetben nem adható meg egyértelműen. A felületi keménységmérésének elsődleges célja a szilárdság becslése.

4.2 A beton nyomószilárdsága [5]

A *nyomószilárdság* a megszilárdult beton egyik kiemelt műszaki jellemzője, s ezt a beton minősítésére, jelölésére, mint leggyakrabban használt minősítési számot alkalmazzuk. A beton nyomószilárdsága több tényezőtől is függ:

- a próbatest alakjától,
- a próbatest méretétől,
- a próbatest pórusvízzel telítettségétől,
- a vizsgáló berendezés nyomólapjainak állapotától,
- a vizsgáló berendezés terhelési sebességétől,
- a víz-cement tényezőtől,
- a tömörítés mértékétől,

- az utókezelés módjától,
- az adalékanyag és a cement típusától.

A *nyomószilárdság vizsgálat* a roncsolásos vizsgálatok közé tartozik, tehát a próbatest a vizsgálat során tönkremegy. Továbbá a betonvizsgálat próbatesteit ugyanazokból az anyagokból és ugyanolyan tömörítéssel kell elkészíteni, mint amilyent az építkezésnél használnak. De van lehetőség a vizsgálandó szerkezetből kifűrt magminták vizsgálatára is. A beton nyomószilárdságát 28 napos korú, 150 mm élhosszúságú, kocka alakú próbatestek, vagy 150 mm átmérőjű és 300 mm magasságú hengerek laboratóriumi vizsgálata alapján adjuk meg. A vizsgálat során a törőerő a próbatestek két felfekvési lapjára egyenletesen elosztva adódik át. A feszültségnövekedési sebességet általában 0,2-2,0 MPa/s (N/mm²s) között kell beállítani. A próbatest törésekor gondosan kell ügyelni arra, hogy a vizsgáló berendezés nyomólapjaival érintkező felületek párhuzamosak és simák legyenek. A törés során kapott legnagyobb elérhető erőt, azaz a törőerőt ($F_{\max}$) az érintkező felülettel (A) osztva megkapjuk a próbatestben ébredő legnagyobb feszültség értékét $\sigma = \frac{F_{\max}}{A}$, azaz a nyomószilárdságot (f_c). A nyomószilárdság szolgál a betonok osztályba sorolására.

4.2.1 A tömörítés hatása [4,5,6]

A frissbetonban nincs tökéletesen folytonos kapcsolat az adalékszemcsék és a cementhabarcs között, közeiket jelentős mennyiségű levegő tölti ki. Mechanikai munka árán kell elérni azt az állapotot, amelyenél a frissbeton térfogategységében a lehető legtöbb anyag van. Ezt a mechanikai munka árán megvalósuló folyamatot nevezzük *tömörödésnek*, magát a munkát pedig *tömörítésnek*. A tömörítés igénye a magas- és mélyépítőiparban alakult ki elsőként.

A frissbetont a keveréstől számított egy órán belül fel kell használni. A keverés után a frissbetonhoz a szállítás folyamán vagy a bedolgozás folyamán vizet utólag tilos keverni, a konzisztenciáját folyósító adalékszer hozzáadásával szabad csak korrigálni.

A betonozás megkezdése előtt a zsaluzatot meg kell tisztítani és a betonnal érintkező felületeket formaleválasztó anyaggal kell bevonni. A betonozást úgy kell elvégezni, hogy a beton a megállapított keverésnek és konzisztenciának megfelelő összetételben kerüljön a szerkezet (vagy próbatest) minden részébe.

A beton bedolgozása, tömörítése *döngölés* vagy *vibrálás* útján történhet. A tömörítést addig kell folytatni, amíg a beton teljes tömegében egyenletes eloszlású, a lehető legtömöttebb, legtömörebb lesz, a zsaluzatot teljes mértékben kitölti és az esetleges acélbetéteket szorosan körülveszi. A megszilárdult beton minősége, szilárdsága és tartóssága döntően függ a helyes bedolgozástól és a jó tömörítéstől. A tömörítést a lehető legnagyobb hatásfok elérése érdekében csak 15-30 cm-es rétegekben szabad elvégezni.

A *döngölést* leginkább földnedves konzisztencia esetén alkalmazzák. A tömörítés $(40\pm 2)\times(40\pm 2)$ mm keresztmetszetű, (500 ± 5) mm hosszúságú farúd vagy $(40\pm 1)\times(40\pm 1)$ mm keresztmetszetű, 200 mm hosszú $(+120-150)$ mm hosszúságú nyél), kemény anyagból készült döngölő segítségével történik. Ez a művelet kézi erő igénybevételével történik. Minden egyes réteget 10-10 ütéssel kell tömöríteni, fontos hogy az ütések egyenletesen oszoljanak el a felületen és a sarkokat is érintsék.

A *vibrálás* a legáltalánosabban alkalmazott betontömörítési mód. A kívánt hatást mechanikai rezgésimpulzusok segítségével érik el. A végrehajtásnál ügyelni kell, hogy ne vibráljuk túl a betont, mert a különböző térfogatú, fajsúlyú és érdességű anyagok szétosztályozódhatnak. Ezért a vibrálás időtartamát előzetes próbák segítségével kell megállapítani. Általában addig kell a tömörítést végezni, amíg a beton tetején a légbuborékok keletkezése megszűnik.

A vibráláshoz választhatunk az elektromos vagy légnemű üzemű tű- és lapvibrátorok közül, a választás mindig az adott körülményektől függ, de elsősorban a gyártott elem alakja és szerkezete határozza meg. Fontos megemlíteni, hogy léteznek olyan betonok, amelyek nem igényelnek kiegészítő tömörítést. Ezeket öntömörödő betonokban nevezzük. Képesek saját súlyuknál fogva a komponensek szétosztályozódásától mentesen tömörödni.

4.2.2 Az utókezelés hatása [3,4,8]

Az *utókezelés* a beton számára szükséges vízmennyiség benntartása a beton kötése és szilárdulása során, azaz a hidratáció zavartalanságának biztosítása. A betonból a víz könnyen távozik, főleg egy napos korrig, és utána a betonba visszajuttatni gyakorlatilag nem lehet. Ezért az utókezelés mielőbbi megkezdése létfontosságú a beton teljesítőképessége szempontjából. A túl korai vízvesztesség a következő következményekkel járhat a felületi tartományban:

- erőteljes korai zsugorodási repedések,
- csekély szilárdság,
- elmállási hajlam,
- csekély tömörség és csekély tartósság,
- gyenge kopásállóság.

A kiszáradás sebessége függ a léghőmérséklettől, a betonhőmérséklettől, a relatív légnedvességtől és a szélsébségtől.

Az utókezelés legfontosabb célja – a hidratáció biztosítása mellett –, hogy védelmet nyújtson az olyan hatások ellen, mint:

- a szél, a napsugárzás és a száraz hideg,
- a szélsőséges hőmérsékletek és a gyors hőmérséklet-változások,

- a csapadék,
- az idegen anyagok (pl.: olaj) korai hatásai.

Az utókezelésnek két általános módja van: nedves környezet folyamatos fenntartása vízzel vagy keverő-víz eltávolításának megakadályozása.

Hatékony utókezelési módszerek a következők:

- vízzel való elárasztás,
- nedves juta vagy terfil szövet,
- nedves juta vagy terfil szövet+műanyag fólia,
- fólia+hőszigetelő réteg+fólia,
- zsáliban tartás,
- párazáró szer (körülbelül egy hétig nyújt védelmet),
- párazáró fólia,
- utókezelésmentesítő adalékszerek.

A szakirodalom szerint nem hatékony utókezelési módszer az időközönkénti locsolás és a PE fólia takarás használata, amely fagyveszélyes időszakban káros is lehet.

Az utókezelés minimum időtartama 36 óra, de vannak olyan speciális esetek, amelyek esetében elő van írva ennél hosszabb minimális időtartam. Például magasépítési szerkezetek esetében 7 nap, vízzáró szerkezetek esetében 14 nap és beton pályaburkolatok esetében 28 nap. Az utókezelés igénye függ a cement-fajtától is. A CEM I-es cementeket minimum 7 napig célszerű utókezelní, míg heterogén cementek esetében ugyanolyan hidratációs fok eléréséhez 21 nap szükséges.

A beton esetleges utókezelésének szakszerű megválasztása és végrehajtása nagymértékben befolyásolja a megszilárdult beton tartósságát és teljesítőképességét.

4.3 Karbonátosodás [1,2,7]

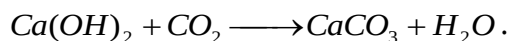
A vasbeton szerkezetek tönkremenetelében a legnagyobb veszélyforrások közé tartozik az acélbetét korróziója. *Karbonátosodásról* akkor beszélünk, amikor a szén-dioxid reakcióba lép egy anyaggal, pl. kalcium-hidroxiddal. Ez a kémiai reakció a beton vagy a cementkő stabilitását nem veszélyezteti, de csökkenti a lúgos kémhatást, a porusolat pH értékét 12,5-ről 9-re vagy az alá csökkenti. A jelenség befolyásolja a felületi keménységet is.

A cement kötőanyagú építőanyagok lúgos kémhatása alapvetően az oltott mészs (Ca(OH)₂, kalcium-hidroxid) jelenlétére vezethető vissza. Az oltott mészs a cement hidratációja során szabadul fel, és hajlamos a légkör szén-dioxid tartalmával reakcióba lépni. A víz jelenléte ezt segíti, biztosítja a közeget a kémiai reakcióhoz. Szokványos betonok esetében szinte mindig rendelkezésre áll elegendő víz. A reak-

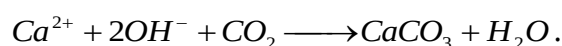
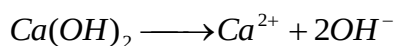
ció során a betonban lévő oltott mész egy része mészkővé (CaCO_3) alakul. Kezdetben a szén-dioxid diffúzió a betonfedésen keresztül azért valósul meg, mert a szén-dioxid koncentráció nagyobb a légkörben, mint a beton pórusaiban. Rövid idő alatt kialakul egy 1 mm-nél vékonyabb karbonátosodott réteg. A további szén-dioxid behatolás a beton kapilláris pórusai áteresztőképességének, illetve a kémiai reakcióhoz rendelkezésre álló oltott mész mennyiségének a függvénye.

Ez a folyamat progresszíven, de nem lineáris módon halad előre a beton belseje felé, a *karbonátosodás frontját*, vagy a *karbonátosodás mélységét* úgy szokás értelmezni, mint azt a távolságot a betonszerkezet külső felületétől, amelyben a pH érték 8,3-ra csökkent az átlagos 12,5-ről. Kimutatása *fenolftalein* ($\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$) szerves vegyület segítségével történik, amelyet gyakran használnak sav-bázis indikátorként. Kísérletek folyamán a vegyület alkoholos oldatát használjuk fel, amelyet spray segítségével a felületre juttatunk. A fenolftalein savas közeg jelenlétében (pH kisebb, mint 8,2) szintelenre, bázis jelenlétében (pH nagyobb, mint 9) lilára, rózsaszínre változik, ezután lemérhető a nem elszíneződött sáv mérete. Érdekességképp megemlítem, hogy létezik egy másik módszer a karbonátosodási mélység meghatározására, amely nem más, mint a neutronsugárzás behatolásának a vizsgálata. Ez a módszer nagy technikai háttérrel igényel, így nem annyira elterjedt, de azonos eredményeket lehet vele kapni, mint a fenolftalein segítségével.

A legfontosabb reakció számunkra az, amelynek során az oltott mész mészkővé alakul:



A reakció első lépése az oltott mész oldódása, amelyet az elnyelődött szén-dioxiddal lejátszódó reakció követ:

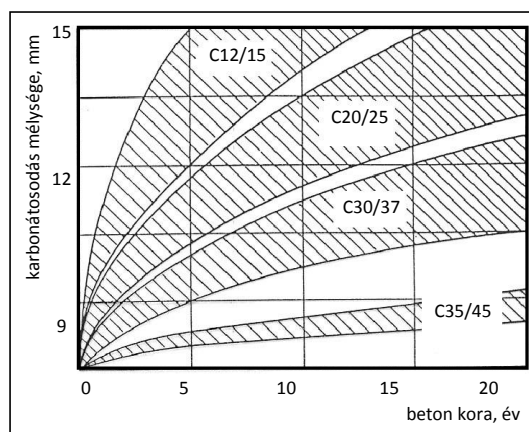


A karbonátosodás folyamata nem kontrollálható. Tudunk olyan betont készíteni, amelyben a folyamat oly mértékben lassú, hogy mérnöki értelemben a karbonátosodási front elér egy határértéket néhány milliméteres mélységben a betonszerkezet felületétől számítva és ezen a ponton szinte megáll a folyamat. A nagyon kis áteresztőképességű betonok esetében a folyamat még tovább lassul abból eredően, hogy a karbonátosodás termékei eltömítik a kapillárisokat.

A karbonátosodás sebessége számos tényezőtől függ. A legfontosabbak ezek közül:

- a beton áteresztőképessége,
- a rendelkezésre álló $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mennyisége,
- a környezet szén-dioxid koncentrációja,
- a környezeti hatásoknak való kitettség mértéke.

A szakirodalmi meghatározás szerint az 56 napnál idősebb betonok esetén már figyelembe kell venni a beton karbonátosodásának hatását keménységmérés során, mert a karbonátosodás a beton felületi keménységének növekedésével jár. A reakció következtében a beton felületi keménysége oly mértékben megváltozhat, hogy annak figyelembevétele nélkül a becslött nyomószilárdság akár 50%-nál is nagyobb mértékben is eltérhet a valóságtól. A szakirodalom javaslatára egy 1,0-nél kisebb szorzótényező bevezetésével javasolják figyelembe venni a karbonátosodás hatását a beton korának függvényében. De önmagában a beton kora és a karbonátosodás között nem lehet egyértelmű kapcsolatot találni, erre ad szemléleti magyarázatot a 4.1 ábra. Figyelembe kell vennünk a beton összetételét, ami helyszíni vizsgálatok esetében nem mindig áll rendelkezésre.



4.1 ábra. A karbonátosodási mélység ábrázolása a beton korának függvényében [30]

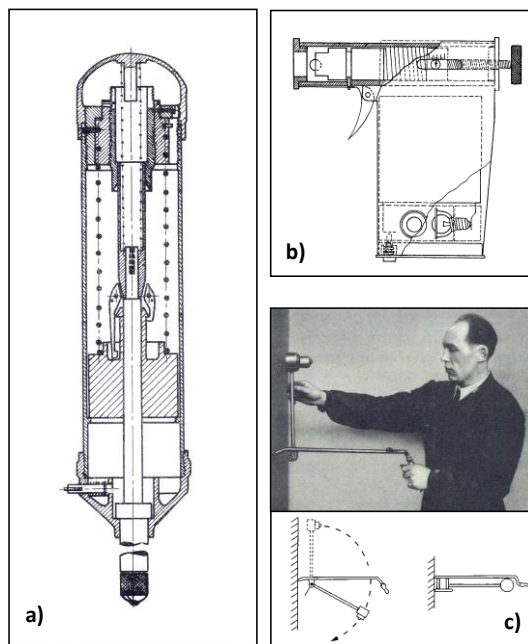
A jövőben a karbonátosodás hatása jelentősen változhat. Egyrészt az új, állandóan növekvő betonszilárdsági igények következtében a betonok áteresztőképessége egyre kisebb lesz. Másrészt a környezet-szennyezésből kifolyólag globális viszonylatban a levegő CO_2 koncentrációja évente több, mint 0,5%-kal nő, így egyre nagyobb hatása lehet a karbonátosodás kialakulásakor.

4.4 A Schmidt-kalapácsos vizsgálat

4.4.1 Az eszköz elődei [12,13,14,15,16]

A beton felületi keménységének mérésére szolgáló hordozható készüléket Németországban mutatták be először 1934-ben. Az első beton felületi keménységmérésre kialakított eszközök nem a jelenleg ismert, rugalmas visszapattanást vizsgáló Schmidt-kalapácsok voltak, hanem felületi benyomódást vagy a betonba való behatolást vizsgáló berendezések. Ezek mára szinte teljesen feledésbe merültek. A működési elvet tekintve a Schmidt-kalapácsnak három elődje nevezhető meg: a Frank-féle rugóskalapács, a Williams-féle vizsgálópisztoly és az Einbeck-féle ingás kalapács, amelyek a 4.2 ábrán láthatók.

A *Frank-féle rugóskalapács* volt az első hordozható vizsgálóeszköz. A belső szerkezeti kialakítása és működési elve nagyban hasonlított a későbbi Schmidt-kalapácsokhoz: egy megfeszített rugó segítségével fejtettek ki ütest a beton felületére. Az eszköz ütőszondájának végén található acélgolyó különböző átmérőkre volt cserélhető a különböző szilárdságú betonok függvényében. Az ütési energia nagysága szabályozható volt 1,25 Nm és 5,00 Nm között, hogy a kialakuló golyónyom átmérője az acélgolyó átmérőjének 0,3-0,7-szerese közé essen. A beton nyomószilárdsága és a golyónyom átmérője, illetve mélysége között függvénykapcsolatokat adtak meg.



4.2 ábra. A Schmidt-kalapács elődei [13,15]

- a) *Frank-féle rugóskalapács*
- b) *Williams-féle rugóskalapács*
- c) *Einbeck-féle ingás kalapács*

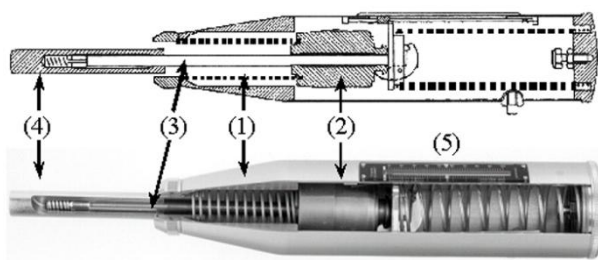
A *The Structural Engineer* (London) folyóiratban 1936-ban *Williams* ismertette a saját fejlesztésű helyszíni keménységmérésre alkalmas berendezését. Az eszköz pisztolyhoz hasonló alakú, 0,9 kg tömegű kézi készülék volt, amely szintén megfeszített rugót használva golyó benyomódást hozott létre a sima betonfelületen. Az eszközzel 7 N/mm^2 körüli nyomószilárdságú betonban 1,5 mm körüli golyó benyomódási mélységet lehetett létrehozni. A feltaláló 200 vizsgálati eredményre alapozva összefüggést adott a beton nyomószilárdsága és a golyónyom felületének reciproka között.

Az *Einbeck-féle ingás kalapács* kialakítása a későbbi ingás Schmidt-kalapácsokéhoz volt hasonló. A csak függőleges felületek vizsgálatára alkalmas eszközben egy ejtőinga végéhez rögzített 2,26 kg tömegű kalapácsfej mérte az ütest a betonfelületre. A beton nyomószilárdsága és a kialakult gömbsüveg alakú golyónyom átmérője/mélysége között adtak meg függvénykapcsolatot.

4.4.2 Működési elv [1,29]

A legelterjedtebb roncsolásmentes vizsgálati eszköz a beton felületi keménységmérésre a *Schmidt-kalapács*. A vizsgálatok során kapott *visszapattanási értékek* alapján a szerkezeti beton nyomószilárdságát tapasztalati összefüggések alapján becsülik. A szerkezeti beton állapota (kor, nedvességtartalom, karbonátosodás mélysége stb.) és összetétele nagymértékben befolyásolja a visszapattanási értékeket, ezért ezek figyelembe vétele nagy jelentőségű. Ha a vizsgálatot egyéb roncsolásmentes vagy roncsolásos vizsgálattal nem egészítjük ki, akkor a Schmidt-kalapáccsal kapott eredményeket csak durva becslésre tudjuk felhasználni.

A Schmidt-kalapáccsal történő vizsgálat elve, hogy a készülékben lévő munkarugó egy vezetőrúdhoz csatlakozó ütőtömeget mozgásba lendít, amely a felületre merőlegesen tartott, íves kontaktfelületű ütőszondán keresztül, adott energiával megüti a vizsgált felületet, és az ütés után az ütőtömeg visszapattanásának mértékét a készülék rögzíti.



4.3 ábra. A Schmidt-kalapács felépítése [49]

(1) a munkarugó, (2) az ütőtömeg, (3) a vezetőrúd, (4) az ütőszonda, (5) kijelző

Az ütés energiája konstans és független a vizsgálatot végző személytől. A *visszapattanási érték* (R) dimenzió nélküli szám, amely a mozgó tömeg ütés közben megtett útjának (x_0) és a visszapattanást követően megtett útjának (x_r) arányát mutatja, tehát arányos az ütőtömeg ütéssel megelőző (E_0) és a visszapattanást követő (E_r) helyzeti energiájának arányával is százalékban kifejezve

$$R = \frac{x_r}{x_0} \cdot 100 = \sqrt{\frac{E_r}{E_0}} \cdot 100.$$

A Schmidt-kalapács szerkezeti elemei megfigyelhetők a 4.3 ábrán. A visszapattanási érték egyben a felületi keménység mérőszáma. A Schmidt-kalapácsos visszapattanási érték a kalapács ütőtömege és a kalapácsnak a betonszerkezet felületéhez nyomott ütőszondája részben rugalmas ütközéséből, az ütközéssel közölt energiának a beton lokális morzsolódása és belső súrlódása következtében bekövetkezett disszipálódásából, valamint az ütés által gerjesztett mechanikai hullámok terjedéséből és visszaverődéseiből alakul ki.

Az ütés, illetve a visszapattanás során elnyelődő energia egy része a készüléken belül, az ütőtömeg mozgása közben súrlódás útján vesz el, más része a beton és a készülék ütőszondájának érintkezési felületén

keresztül, az ütés pillanatában a betonban disszipálódik. Az ütés pillanatában a betonban elnyelődő energia nagysága függ a beton nyomószilárdságától és rugalmassági modulusától is, ezáltal a beton feszültség-alakváltozás diagramjának függvénye.

Az egyszerűsített energiamérleg felírásakor láthatóvá válik, hogy minél több a betonban elnyelődött energia, annál kisebb lesz az ütőtömeg ütés utáni mozgási energiája, tehát a Schmidt-kalapácsos visszapattanási érték:

$$E_0 = E_r + E_{súrl} + E_{dissz}$$
$$E_r = (E_0 - E_{súrl}) - E_{dissz}$$

ahol E_0 a mozgó tömeg helyzeti energiája az ütest megelőzően, E_r a mozgó tömeg visszapattanást eredményező helyzeti energiája, $E_{súrl}$ az ütőtömeg mozgása közben súrlódással elnyelődő energia és E_{dissz} a beton és a készülék ütőszondájának érintkezésével az ütés pillanatában a beton disszipálódó energia.

Lehetséges azonos nyomószilárdságú, de eltérő rugalmassági modulusú és energiaelnyelő-képességű betonokat készíteni, így azonos nyomószilárdságú betonok esetén is kaphatunk eltérő visszapattanási értéket és fordítva, azonos visszapattanási értékeket kaphatunk eltérő nyomószilárdságú betonokra. Ezért nem elhanyagolható az adalékanyagok rugalmassági modulusának hatása a visszapattanási értékekre.

Az ütés pillanatában a beton felületén kialakuló mikro-mechanikai deformáció mechanikai hullámokat indít el a betonban. E hullámok terjedése szilárd közegben hasonlít a hang terjedéséhez a levegőben. Az ütőszondából, mint pontbeli hullámforrásból kiindulva P-típusú longitudinális és S-típusú transzverzális hullámok terjednek a betontestben, továbbá R-típusú felületi hullámok terjednek a betontest felületén. Ha a visszaverődő mechanikai hullámok hullámfrontja eléri a hullámforrást mielőtt az ütőszonda és a beton-felület kapcsolata megszűnne, akkor a mért visszapattanási értékre ez hatással van. Ismerve a mechanikai hullámok sebességét, ez a hatás mindig létrejön.

4.4.3 A Schmidt-kalapács típusai [1,17,18,30]

A Schmidt-kalapácsot Ernst Schmidt svájci mérnök, feltaláló alakította ki 1948-ban, majd szabadalmaztatta 1950-ben. Az első generációs eszköz eredetileg két, párhuzamosan futó munkarugót tartalmazott. A használata komoly gyakorlatot és figyelmet igényelt, továbbá minden mérés előtt le kellett nullázni a csúszkás kijelzőt, ez sok időt igényelt. 1952-ben megszületett a második generációs eszköz, mely egy munkarugós felépítésű. A vizsgálat ez által jóval egyszerűbbé vált, de a visszapattanási értékek 20%-kal alacsonyabbak lettek, mint a korábbi modellnél. A mechanikai szerkezet gyakorlatilag változatlan a jelenlegi gyártó cég, a Proceq SA 1954-es megalapítása óta, és az elmúlt 60 évben a világon mindenütt közismert helyszíni vizsgáló eszközzé vált, így bőséges gyakorlati tapasztalat áll már rendelkezésre.

2007 novemberében véglegesítették és piacra dobták az ún. Silver Schmidt-kalapácsokat. Ezek már – az eredeti visszapattanási érték mellett – a beton C_r ütközési tényezőjét is képesek voltak mérni, majd 2011-

ben az új készülékek teljes egészében áttértek az ütközési tényező mérésére, és az eredeti visszapattanási értékét ma már nem jelzik ki.

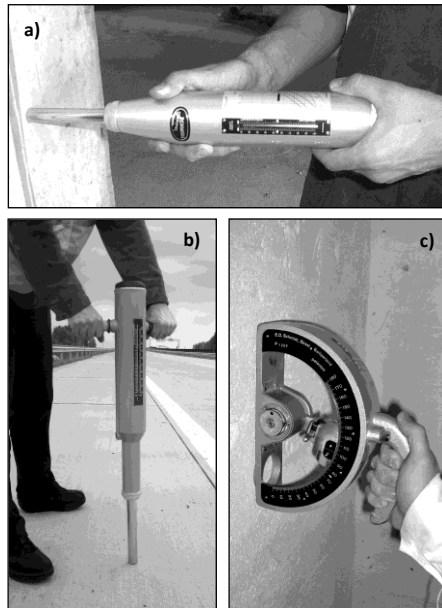
Az eredeti Schmidt-kalapácsok a *Shore* által 1911-ben bemutatott szkleroszkóp módszer alapján működnek. A szkleroszkópok ütközést vizsgáló készülékek, amelyekben egy rugó által vagy gravitáció által mozgásba lendített ütőtömeg nekiütközik a vizsgált felületnek és a keménységi mérőszámot az ütközési visszapattanás alapján definiáljuk. Kétféle típusú keménységi indexet alkalmazunk:

1. az ütőtömeg által az ütközés után és előtt megtett út aránya,
2. az ütőtömeg ütközés utáni és előtti sebességének aránya.

Normál betonok vizsgálatára általában az *N-típusú Schmidt-kalapács*ot használjuk, amely 10-70 N/mm² nyomószilárdságú betonok vizsgálatára javasolt. Az ütési energiája 2,207 Nm. Azonos célra és azonos módon használjuk az *NR-típusú Schmidt-kalapács*ot, amely papírra rögzíti a visszapattanási értékeket. Szintén az N-típushoz hasonlóan használjuk *DIGI-Schmidt kalapács*ot, amely digitálisan rögzíti az adatokat. Utóbbi két műszeren található rögzítő berendezések nagyban felgyorsítják a munka menetét. Vékony falú (<100 mm) beton vagy kő szerkezeti elemek vizsgálatára szolgál az *L-típusú Schmidt-kalapács*, amelynek ütési energiája csak a harmada az N-típusú Schmidt-kalapácsénak, ez 0,735 Nm-t jelent. Égetett kerámia szerkezeti elem vizsgálatára is van lehetőség az *LB jelzésű Schmidt-kalapáccsal*, amelynek ütési energiája azonos az L-típusú Schmidt-kalapácséval, de az ütőszondájának a kialakítása eltérő. A legnagyobb ütési energiával (29,43 Nm) rendelkezik az *M-típusú Schmidt-kalapács*, amely elsősorban nagy szilárdságú útbetonokhoz, térbetonokhoz használatos. Az eddig említett eszközök mechanikai kialakítása mind megegyező, de forgalmaznak úgynevezett *P-típusú ingás* kialakítású Schmidt-kalapácsokat is. Ezt elsősorban kis nyomószilárdságú anyagok, mint például habarcsok, könnyűbetonok, kerámiák, kőzetek vizsgálatára használják, ütési energiája ennek megfelelően kisebb: 0,883 Nm. Az N-, M- és P-típusú Schmidt-kalapács használat közben látható a 4.4 ábrán.

4.4.4 A vizsgálat feltételei [1,19]

Az MSZ EN 12504-2:2001-es szabvány kimondja, hogy mivel a Schmidt-kalapácsok saját kalibrálású vizsgálóeszközök, ezért a használonak rendelkeznie kell egy *szabványos kalibráló üllővel*, amelyen minden vizsgálatot megelőzően és követően, de legritkábban 1000 ütésenként el kell végezni az ellenőrzést, hogy az eszköz mechanikai alkatrészei rendeltetésszerűen működnek-e, tehát alkalmas-e a vizsgálatra. A szabvány előírja, hogy a visszapattanási érték egy meghatározott értéktől maximálisan két egységnyire térhet el mind pozitív, mint negatív irányba. A gyári kézikönyv javaslatai szerint a Schmidt-kalapácsok biztonságosan használhatók -10 °C és +60 °C között, de a szabvány ettől szigorúbb intervallumot határoz meg, a készülék csak +10 °C és +35 °C közötti hőmérsékleten használható.



4.4 ábra. A Schmidt-kalapács egyes típusai [1]

a) az N-típusú modell

b) az M-típusú modell

c) a P-típusú modell

4.4.5 Befolyásoló tényezők [1,17,20,26,31]

A Schmidt-kalapácsos vizsgálat során kapott visszapattanási értéket a készülék ütőszondájának közvetlen környezetében lévő beton tulajdonságai határozzák meg. Ennél fogva a mérésünket befolyásolhatja egy nagyobb adalékanyag vagy légzárvány, így az első esetben lényegesen nagyobb, míg a második esetben lényegesen kisebb visszapattanási értéket kapunk.

A visszapattanási értéket befolyásoló főbb tényezők:

- a betonkeverék oldaláról: cement fajtája és mennyisége, az adalékanyag fajtája,
- a szerkezet oldaláról: a szerkezeti elem tömege és tömörsége, a betonfelület minősége, a beton kora, az utókezelés módja, a karbonátosodás mértéke, a nedvességtartalom, a hőmérséklet és a feszültségi állapot.

Az ütés irányát mindig a gravitációhoz képest fogalmazzuk meg. A Schmidt-kalapács használatának *alapértelmezett ütésiránya* a vízszintes irány. Ernst Schmidt kimondta, hogy ugyanazon betonszerkezeten végzett méréseknél a visszapattanási érték a függőleges lefelé irányuló ütés esetén rendre kisebb, viszont a függőleges felfelé irányuló ütés esetén rendre nagyobb visszapattanási értékeket kapunk, mint a vízszintes ütésiránnyal kapható visszapattanási értékek. A mérési eredményeket ezért mindig korrigálni kell, hisz az empirikus összefüggések a vízszintesen végzett mérések eredményeit használják fel.

A beton nedvességtartalma befolyásolja a mért visszapattanási értéket, bár a szakirodalom nem ad meg összefüggést a beton nedvességtartalma és a visszapattanási érték változása között. Egyes szakirodalmi források szerint, a beton víztelített állapotában történő méréskor a visszapattanási értékek 20%-kal is csökkenhetnek. Más források is alátámasztják ezt a tapasztalatot, de az eltérés mértékét kisebbnek határozták meg.

A cement fajtája és a cement mennyisége is nagyban befolyásolja a visszapattanási értékeket, a különbségek meghaladhatják az 50%-ot. A cement őrlésfinomságának hatását nem tekintik befolyásoló tényezőnek, a hatása nem haladja meg a 10%-ot. A cement fajtájának és mennyiségének figyelembe vételére egyes szakirodalmi források adnak javaslatot, ezek többnyire bizonytalanságot hordoznak és csak a hivatkozott esetekre érvényesek. Megállapítható, hogy laboratóriumi körülmények között készített, utókezelt és vizsgált betonok esetén a Schmidt-kalapácsos szilárdságbecslés 15-20%-os bizonytalansággal, míg valós szerkezeteknél 25%-os bizonytalansággal szolgáltat eredményt.

Az adalékanyag típusa és szemcseméret-eloszlása is hatással van a mért visszapattanási értékre. Az adalékanyag rugalmassági modulusának hatása szintén kiemelkedő. A szakirodalom esetenként javaslatot tesz ezek figyelembe vételére is.

4.4.6 A mérés ismétlésszáma [1,20,31,32,33,34]

A visszapattanási értéket befolyásoló nagyszámú tényezőre való figyelemmel nem elégséges néhány mérés elvégzése a legvalószínűbb visszapattanási érték meghatározásához.

A roncsolásmentes betonvizsgálatokkal foglalkozó egykori RILEM munkabizottság álláspontja szerint több, mint 25 ütést meghaladó mintaszám-érték már elégséges. A magyar szakirodalomban található álláspont legalább 100 ütést tart elégségesnek, amely mintaszámot egyes matematikai statisztikai jellemzők aszimptotikus viselkedésének vizsgálatával ellenőrizhetünk.

Arni laboratóriumi vizsgálatokkal igazolta, hogy egy-egy betontétel között 200 psi (kb. 1,4 MPa) szilárdságkülönbség mutatható ki 8 darab szabványos henger törővizsgálata vagy 120 darab Schmidt-kalapácsos visszapattanási érték alapján.

Azt is igazolták, hogy egy vizsgálati helyre vonatkozóan a visszapattanási érték várható értéke $\pm \frac{15}{\sqrt{n}}$

%-on belüli eltéréssel, 95%-os megbízhatósággal kapható meg, ha a vizsgálati helyen mért visszapattanási értékek száma legalább tíz.

Leshchinsky matematikai statisztikai elvek alapján alkotott meg összefüggést a roncsolásmentes vizsgálati módszerek esetén szükséges vizsgálati mintaszámra (n):

$n = \frac{t^2 \cdot V_f^2}{p^2}$, ahol V_f a szerkezeti beton nyomószilárdságának variációs együtthatója; p a nyomószilárdság becslésének elfogadható hibaszázaléka és t az ún. Student-tényező.

4.5 A visszapattanási értékek és a nyomószilárdság összefüggése [1,13,28]

A Schmidt-kalapáccsal végzett vizsgálatok során kapott visszapattanási értékek alapján a szerkezeti beton nyomószilárdsága *tapasztalati összefüggések* alapján határozható meg. A különböző kapcsolatok csak az adott kísérleti háttér által szolgáltatott peremfeltételek között értelmezhetőek és használhatóak. Egy tényleges szerkezet esetén mindig igazolni kell a szilárdságbecslő összefüggés alkalmazhatóságát. A szakirodalomban megfogalmazott empirikus összefüggések általában 28 napos korú, légszáraz állapotú betonokra érvényesek.

A szakirodalom az elmúlt 60 évben különböző *empirikus összefüggéseket* adott a Schmidt-kalapácsos visszapattanási érték és a szerkezeti beton nyomószilárdsága között feltételezhető függvénykapcsolatra:

1. lineáris függvénykapcsolat:

$$f_{cm} = a + b \cdot R,$$

2. hatvány függvénykapcsolat:

$$f_{cm} = a + b \cdot R^c,$$

3. polinomiális függvénykapcsolat:

$$f_{cm} = a + b + c \cdot R^2 + \dots + n \cdot R^m,$$

4. exponenciális függvénykapcsolat:

$$f_{cm} = a + b \cdot e^{c \cdot R},$$

5. logaritmikus függvénykapcsolat:

$$\log_a(f_{cm}) = b + \log_a(R),$$

6. összetett, nemlineáris függvénykapcsolat:

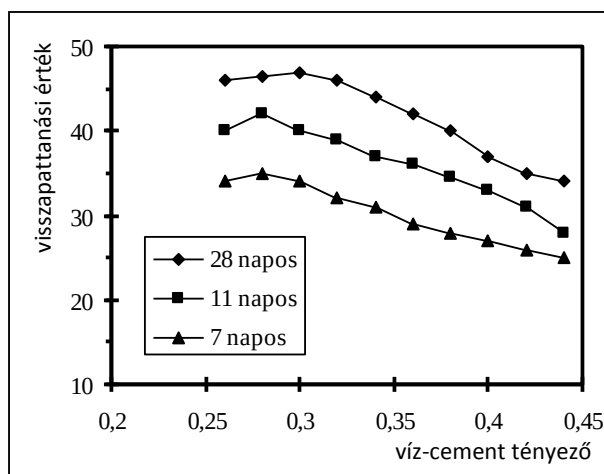
$$f_{cm} = \zeta(R),$$

(ahol f_{cm} a szerkezeti beton nyomószilárdságának várható értéke, R a visszapattanási értékek várható értéke, továbbá a...n empirikus paraméterek).

A szakirodalomban már korábban publikált javaslatokból is látszott, hogy a beton felületi keménysége és nyomószilárdsága között nem feltételezhető lineáris függvénykapcsolat, bár számos kutató talált és javasolt fölvenni lineáris összefüggést a Schmidt-kalapácsos visszapattanási értékek és a beton nyomószilárdsága között. Kiszámú vizsgálati eredmény esetén, a módszer vizsgálaton belüli szórása miatt egy látszólagos lineáris kapcsolat állítható elő.

A visszapattanási értékek és a beton nyomószilárdsága között egyértelmű, fizikai okokra visszavezethető összefüggés nincs, csak empirikus összefüggések találhatók. Ennek elsődleges oka, hogy a beton makroszkopikus értelemben heterogén és a Schmidt-kalapácsos vizsgálat a betonszerkezet néhány tíz mm vastag, felületi rétegét érinti. A mérési eredmények a felületi keménység relatív nagyságáról szolgáltatnak információt és a beton további szilárdságjellemzőivel nehezen hozhatók kapcsolatba. Viszont az elmúlt 60 év tapasztalatai azt mutatják, hogy bizonyos tapasztalati összefüggések találhatók.

A 4.5 ábrán különböző korú cementkő próbatesteken mért Schmidt-kalapácsos visszapattanási értékek vannak ábrázolva a víz-cement tényező függvényében. Az eredmények rámutatnak, hogy a cementkő felületi keménysége érzékeny a víz-cement tényező változására.



4.5 ábra. A visszapattanási érték és a víz-cement tényező összefüggése [28]

4.6 A szilárdságbecslés megbízhatóságának javítása [1]

Ha egy szerkezet betonjának nyomószilárdságát a becslés megbízhatóságának és a gazdaságos használatnak az optimuma mellett szeretnénk becsülni, akkor a vizsgálatot célszerű kiegészíteni:

- kifűrt magminták egyidejű nyomószilárdság vizsgálatával (lásd pl. MSZ EN 13791:2007),
- a műtárgy betonjából, a kivitelezéssel párhuzamosan betonozott próbatestek nyomószilárdság vizsgálatával,
- egyéb roncsolásmentes szilárdságbecslő eljárások egyidejű alkalmazásával,
- a Schmidt-kalapácsos vizsgálat kiértékelő eljárásában empirikus paraméterek bevezetésével, amelyekkel a műtárgy betonjának összetételét, tulajdonságait igyekszünk figyelembe venni.

A lehetőségek bizonytalansága a felsorolásban fentről lefelé nő, azaz megbízhatóságuk ebben a sorrendben csökken.

A szakirodalmat vizsgálva a legtöbb szerző által biztonságosnak tartott módszer a kifűrt magminták egyidejű vizsgálata, amely egybevág az MSZ EN 13791:2007 szabvány alapelveivel (lásd 4.7.1 fejezet).

A műtárgy építésével egy időben készített próbatestek vizsgálata esetén már körültekintőnek kell lenni, hiszen a bedolgozás és a tárolás módja jelentősen eltérhet a műtárgyétól. Ennek jelentőségére már 1938-ban felhívta szakcikk a figyelmet.

Más roncsolásmentes vagy kis roncsolással járó szilárdságbecslő eljárások egyidejű alkalmazásával szintén növelhető a becslés megbízhatósága. Ezen eljárások például az ultrahangos módszerek, a szonda-behatolás vizsgálata, kiszakító vizsgálatok vagy leszakító vizsgálatok. A vizsgálatot és értékelést végzőnek magas szintű szakmai felkészültségre és nagy gyakorlatra van szüksége.

A tapasztalati paraméterek bevezetése tűnhet a legegyszerűbbnek és leginkább költségkímélőnek, de ezek a módszerek bizonytalanságot hordoznak magukban, amelyek figyelmen kívül hagyása a biztonság kárára tett súlyos elhanyagolást eredményezhet. Jelenleg egy hazai műszaki előírás megengedi ilyen módszer használatát.

4.7 Szabványosítás

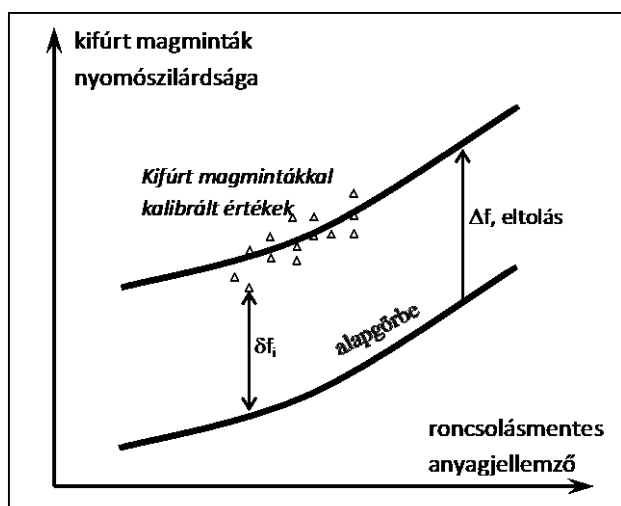
4.7.1 Európai javaslat [1,21]

Mivel Magyarország az Európai Unió egyik tagállama, az elmúlt évek alatt a korábban használatos Magyar Szabványokat (MSZ) lecserélték az Európai Szabványokra (EN). A betonnal foglalkozó előírások az EN 206-1 szabvány köré rendeződnek. Az MSZ EN 13791:2007 jelzésű, „Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components” című szabvány ad leírást a beton nyomószilárdságának helyszíni vizsgálatokon alapuló meghatározásáról. Ezt a szabvány 2007. június 15-én hagyta jóvá a Magyar Szabványügyi Testület (MSZT). A szabványt tanulmányozva észrevehetjük, hogy az alkalmazási területe azokra a vizsgálati módszerekre terjed ki, amelyek esetében a roncsolásmentes módszerekkel kapott közvetett szilárdságjellemzők és a szerkezetből kifűrt magminták nyomószilárdsága közötti korrelációt meghatározzuk. Ez alapján a szabvány kizárja a roncsolásmentes eszközök önmagukban történő vagy többük együttes használatát a kifűrt magminták vizsgálata nélkül.

A szabvány a roncsolásmentes szilárdságvizsgálatok értékeléséhez több lehetséges módszert is ajánl. Az egyik módszert a 4.6 ábra mutatja be, miszerint a szilárdságbecsléshez *alapgörbét* vezet be, amelyekkel oly módon teremthető függvénykapcsolat a szerkezeti beton nyomószilárdsága és a roncsolásmentes módszerrel mért közvetett szilárdságjellemzők között, hogy az alapgörbét kalibráljuk a szerkezetből kifűrt, minimálisan *kilenc darab magminta* nyomószilárdsági vizsgálata segítségével, tehát függvénytranszformációval az alapgörbét az adott szerkezetre érvényesnek tekinthető helyzetbe eltoljuk.

A szabvány a kifűrandó magminták átmérőjét 50-150 mm közötti méretre korlátozza, így az 50 mm-nél kisebb átmérőjű kifűrt magmintákra az MSZ EN 13791:2007 nem vonatkozik. A kifűrt magmintákat a vizsgálatokat megelőzően három napig laborlevegőn kell tárolnunk.

A szabvány alapgondolata alapvetően helyesnek tartott, mert a roncsolásmentes módszerrel meghatározható közvetett szilárdságjellemzők értékét nagyszámú paraméter befolyásolja. A szerkezet betonjának nyomószilárdsága a kifúrt magminták segítségével becsülhető a legnagyobb biztonsággal, bár ezzel kizárjuk azon szerkezetek vizsgálatát, amelyek esetében nem lehetséges a 9 darab magminta kifúrása. Ezekben az esetekben nem alkalmazhatók a szabvány által javasolt alapgörbék, ugyanis függvénytranszformáció nélkül azok nem használhatók. A szabványban megadott alapgörbék a kifúrt magminták nyomószilárdsága és a roncsolásmentes anyagjellemzők között fennálló függvénykapcsolatok alakját adják meg, a függvények pontos helyét azonban nem. Az MSZ EN 13791:2007 kijelenti, hogy az alapgörbék a biztonság javára tett közelítést definiálnak, amelyből a függvény eltolása mindig pozitív értelmű, tehát fölfelé történik. A szabvány azt is engedi, hogy akár minden vizsgálat esetén új, az adott műtárgyra érvényes értékelő függvényt vezessünk be. Feltétele, hogy legalább 18 darab kifúrt magminta alapján alkossák meg a függvénykapcsolatot.



4.6 ábra. Az MSZ EN 13791:2007 alapgörbe függvény-transzformációja [21]

4.7.2 Hazai javaslatok

4.7.2.1 Tapasztalati paraméterek használata az értékelés során [1]

Magyarországon régóta és széles körben folynak vizsgálatok a Schmidt-kalapácsos roncsolásmentes betonvizsgálatok területén. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékén a mai napig kiemelt figyelmet kap a roncsolásmentes betonvizsgálat. Két múltbeli kísérletsorozatot emelnék ki:

- Roknich György javaslatát, amely az egykori Magyar Szabványügyi Hivatal „Szabványosítási szakkönyvtár” könyvsorozatában is megjelent ajánlasként,
- Borján József javaslatát, amely a jelenleg is hatályos e-ÚT 09.04.11 (ÚT 2-2.204:1999) Útügyi Műszaki Előírás javasolt módszerei között szerepel.

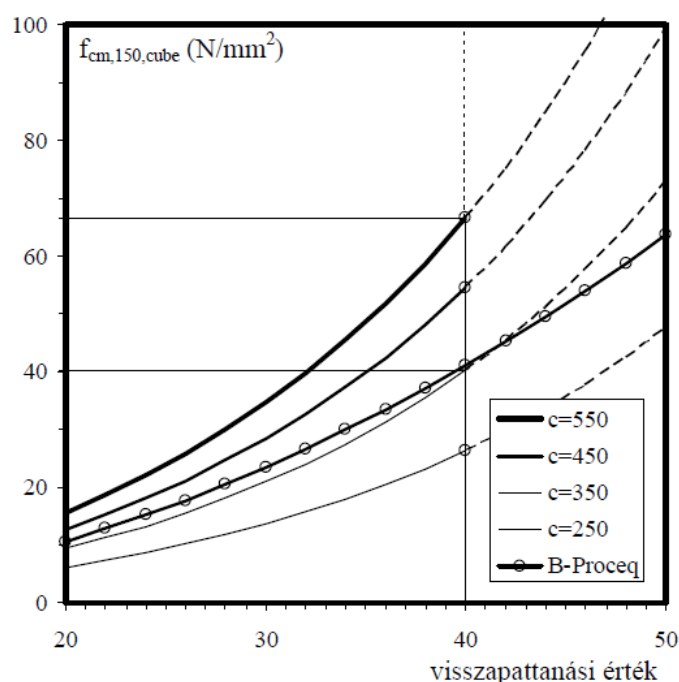
4.7.2.2 Roknich György javaslata [1,22,23,24]

Az 1960-as években az Útügyi Kutató Intézetben széleskörű laboratóriumi vizsgálatokat folytattak a Schmidt-kalapácsos roncsolásmentes vizsgálatok területén, amely alapján háziszabvány-tervezet is készült Roknich György által 1966-ban. Olyan függvénykapcsolatot alakítottak ki az N-típusú Schmidt-kalapáccsal kapható visszapattanási értékek és a beton nyomószilárdsága között, amely figyelembe vesz egyes betontechnológiai paramétereket (cementtartalom, cement típusa és az adalékanyag összetétele), illetve a beton korát.

A függvénykapcsolat általános alakja:

$$f_{cm,200,cube} = \frac{9099,18}{(2^{(5-10C)} + 3,178 - 0,65\alpha) \cdot i} \cdot \frac{R^2 + 0,067 \cdot R}{0,773 - (R^2 + 0,067 \cdot R)}$$

Az egyenletben szereplő R a visszapattanási érték, c a cementtartalomra vonatkozó paraméter, α az adalékanyagban a homok és kavics tömegének aránya a zúzott adalékanyaghoz képest, i pedig az időt figyelembe vevő paraméter.



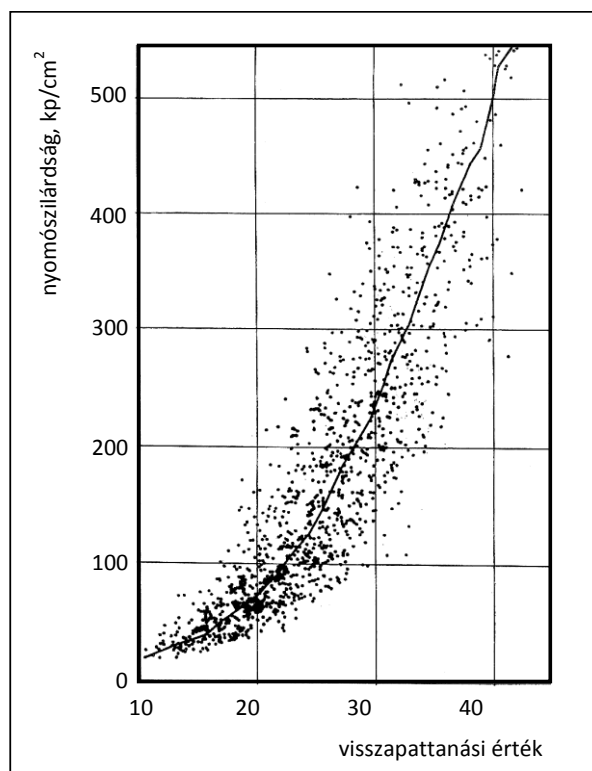
4.7 ábra. Szilárdságbecslő függvények Roknich alapján [24]

A módszer javaslatot tett a vízszintestől tetszőleges szögben történő eltérés figyelembe vételére is. A szakirodalomban is közölt 4.7 ábrán megfigyelhető, hogyan változik a visszapattanási érték-nyomószilárdság kapcsolat változatlan adalékanyag-összetételű és változatlan korú (28 napos) betonkeverékek során vízszintes ütési irány esetén, különböző cementtartalmak figyelembe vételekor, amelyek rendre 250, 350, 450, 550 kg/m³ értékűek. Látható, hogy a felépítéséből kifolyólag nagyon érzékenyen

reagál a cementtartalom változására. A legkisebb és a legnagyobb cementtartalomhoz tartozó becsült nyomószilárdságok különbsége 9 N/mm^2 és 73 N/mm^2 között változik. E különbség a nagyobb visszapattanási értékek tartományában már indokolatlanul nagy. Oka, hogy ebben a tartományban a kísérleti háttér nyújtotta peremfeltételeken kívüli az extrapoláció.

4.7.2.3 Borján József javaslata [1,25,26,27]

Az 1970-es években a Budapesti Műszaki Egyetemen folytak vizsgálatok a roncsolásmentes szilárdságbecslő módszerek területén, ez volt a *Borján-féle kísérletsorozat*. Különlegessége, hogy kilencfaktoros, ún. teljes kísérletet végeztek, amely ezen a területen úttörőnek számított. A különböző *faktorok*, azaz kísérleti paraméterek a következők voltak: a cement fajtája, az adalékanyag legnagyobb szemnagysága, az adalékanyag finomsági modulusa, a víz-cement tényező, a péptartalom, a bedolgozás módja, az utókezelés módja, a beton kora a vizsgálatkor és a beton nedvességtartalma vizsgálatkor. A kísérleti terv 48 különböző betonkeverék és 24 eltérő kezelésfajta kombinációjának eredményeként 1152 próbatestből álló kísérletsorozatot eredményezett. Ismétlés nélküli kísérletről beszélünk, tehát a megvizsgált próbatestek mindegyike más-más faktor-kombinációval készült, azaz nem volt két tökéletesen egyforma próbatest. Figyelemre méltó, hogy a kísérletsorozat a személyi számítógépek elterjedését megelőzően készült és a kutatók mindent kézi módszerekkel számoltak ki és minden eredményt ábrázoltak grafikonon. Eredményeik láthatók a 4.8 ábrán.



4.8 ábra. Talabér, Borján, Józsa összes mérési eredménye közös diagramon ábrázolva [26]

A Borján-féle kísérletsorozat további különlegessége volt, a kiértékelések során nem a valóságosan is összetartozó visszapattanási érték - nyomószilárdság adatpárokat vizsgálták, hanem a mérési eredményekből képzett rendezett minták azonos sorszámú elemeinek egymás mellé rendelésével előállított adatpárokat tanulmányozták. Az így nyert adatpárok fölfoghatók a *Reimann-féle kvantilisgörbe* egyfajta egyszerűsített formában megadott tapasztalati közelítéseként, ezért a kutatók ezekre, mint ún. kvantilispontokra hivatkoztak tanulmányaikban. A kvantilisgörbék, sztochasztikus kapcsolatban lévő mennyiségek közötti függvénykapcsolat jellegéről adnak közelítő képet. Két valószínűségi változó kapcsolatát sztochasztikusnak nevezzük, ha egymástól nem függetlenek, azaz egyik befolyásolja a másikat, de azt teljesen egyértelműen nem határozza meg. A beton nyomószilárdsága és a visszapattanási érték sztochasztikus kapcsolatban állnak egymással. Kvantilisgörbék pontjait viszonylag egyszerűen előállíthatjuk, ha az ismert $F(x)$ és $G(y)$ eloszlásfüggvényű, sztochasztikus kapcsolatban lévő X és Y valószínűségi változók azonos $F(x_\alpha) = G(y_\alpha) = \alpha$ előfordulási valószínűségekhez tartozó kvantiliseinek függvényértékeit (x_α, y_α) egymás mellé rendeljük.

A kvantilispontok és kvantilisgörbék bevezetése két okból lehet célszerű a roncsolásmentes vizsgálatok értékelésekor. Az egyik ok, hogy egy kvantilisgörbe a két, sztochasztikus kapcsolatban lévő valószínűségi változó közötti függvénykapcsolatot oly módon fejezi ki, hogy a reziduális eltérést mindkét változó szerint egyidejűleg minimalizálja. Így olyan függvény keletkezik, amely mentes a regressziós elemzés alkalmazásának hibáitól. A másik ok, hogy a kvantilisgörbe előállításával észlelhetővé válnak olyan faktorhatások is, amelyek a valóságosan összetartozó visszapattanási érték-nyomószilárdság adatpárok ábrázolása során nem észlelhetők. A kutatók által bevezetett módszerrel a regressziós elemzés hibája csökkenthető és a faktorhatások is könnyebben elemezhetővé válnak.

A vizsgálatok eredményeként a kutatók a kettős logaritmikus hálózatban ábrázolt kvantilispontokra másodfokú polinomfüggvényt illesztettek.

A szilárdságbecslő függvénykapcsolat középgörbéje:

$$\lg f_{cm,200,cube} = -1,055 + 1,805 \cdot \lg R + 0,345 \cdot (\lg R)^2 \quad (\text{N/mm}^2)$$

A becslés megbízhatóságának fokozására a kutatók bevezettek empirikus paramétereket, amelyek a beton összetételét és tulajdonságait veszik figyelembe. Az empirikus paraméterek additív jellegüknél fogva a kettős logaritmikus hálózatban ábrázolt középgörbét önmagával párhuzamosan fölfelé, a nagyobb nyomószilárdságok irányában tolták el. Így tehát a szilárdságbecslés megbízhatóságának növelésével mindenkor nagyobb nyomószilárdságot kaptak, mint amit a középgörbe használata eredményezne. A kutatók megállapították, hogy a vizsgált paraméterek kölcsönhatásai esetenként erősek és halmozódnak, ezért ezeket figyelembe venni csak korlátozott mértékben szabad.

4.8 Statisztikai alapok

4.8.1 Statisztikai jellemzők [8,35,42]

A vizsgálatok során nagy méretű adatsorok nyerhetők, amelyeket a matematikai statisztika elvei alapján dolgozunk fel. Lényege a vizsgált szerkezetek egyértelmű jellemzése kevés paraméterrel. Az általam vizsgált statisztikai jellemzőkre adok definíciót ebben a fejezetben.

A *számtani középérték* (x_m): a számtani vagy aritmetikai középértéken n darab szám átlagát, azaz a számok összegének n -ed részét értjük.

Képlete: $x_m = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$; mértékegysége azonos a vizsgált adatával.

A *szórás* (s): az egyes értékek számtani átlagtól való négyzetes eltéréseinek átlagát hívjuk szórásnak. A szórás a variancia vagy szórásnégyzet pozitív négyzetgyöke.

Képlete: $s = \sqrt{\frac{(x_1 - x_m)^2 + (x_2 - x_m)^2 + (x_3 - x_m)^2 + \dots + (x_n - x_m)^2}{n}}$; mértékegysége megegyezik az alapadatokéval.

A *szóródás terjedelme* (r): az adatsorban előforduló legnagyobb és legkisebb érték különbsége a szóródás terjedelme. Könnyen számítható, jól értelmezhető mérőszám.

Képlete: $r = x_{\max} - x_{\min}$; mértékegysége azonos a vizsgált adatával.

A mutató hátránya, hogy csak a szélső értékekre épít, így egy-egy kiugró érték esetén értékét a véletlen számottevően befolyásolja.

A *relatív szórás* (V): a szórásnak a vizsgált adatsor átlagához viszonyított mértékét jelzi a relatív szórás.

Képlete: $V = \frac{s}{x_m}$; mértékegysége dimenziótalan vagy %.

A *relatív terjedelem* (ς): az adatsorban előforduló legnagyobb és legkisebb érték különbségét az adatsor átlagához viszonyítja a relatív terjedelem, ezáltal különböző átlagú adatsorok terjedelmének összehasonlítására is alkalmas.

Képlete: $\varsigma = \frac{r}{x_m}$; mértékegysége dimenziótalan vagy %.

A relatív terjedelem az átlaghoz való viszonyítás segítségével különböző mértékegységű adatsorok összehasonlítására is alkalmas.

A *studentizált terjedelem* (θ): a mintában található legnagyobb és legkisebb érték különbsége osztva a tapasztalati szórással (nem keverendő össze a *standardizált terjedelem* (ω) elméleti fogalmával, amelyben az elméleti szórás szerepel és nem a tapasztalati szórás).

Képlete: $\theta = \frac{r}{s}$; mértékegysége dimenziótalan vagy %.

Nagyszámú adatsor (több mint 50 mérés) esetén célszerű az adatokat osztályokba sorolni, azaz a mérés-eredmények tartományát k egyenlő széles *osztály*ra osztani. A k értékének a megválasztására szolgáló

ökölszabály: $k \approx \sqrt{n}$. Az osztály szélessége ebből: $c \cong \frac{x_n - x_1}{k}$.

Mérések száma	Osztályok száma
<50	5-7
50-100	6-10
100-250	7-12
>250	10-20

Figyelni kell arra, hogy a szélső osztályok ne maradjanak nyíltak, tehát legyen az alsónak alsó, a felsőnek felső határa. Ezek meghatározása után minden mérési eredményt besorolunk a neki megfelelő osztályba.

A mennyiségeket a szorosan egymás mellé rajzolt téglalapok jelölik, ahol az egyes téglalapok területe az adott osztály gyakoriságát mutatja, az ilyen ábrázolásokat *hisztogram*oknak nevezzük. A téglalapok magassága az osztály gyakorisági sűrűségét jelöli, ami az adott osztály szélességével leosztott gyakoriság. A hisztogramok felfoghatók a folytonos valószínűségi változó sűrűségfüggvényének becsléseként.

A hisztogramok jellemzésére az eloszlásjellemzőket használjuk. Ezek azt mutatják meg, hogy a mérési eredmények milyen érték körül ingadoznak, illetve hogy ettől az értéktől mennyire térnek el, mekkora a szórás.

A gyakorisági és az eloszlási hisztogramokat sűrűség- és eloszlásfüggvényekkel szokás helyettesíteni. Az eloszlásfüggvényből $F(x)$ a sűrűségfüggvény $f(x)$ előállítható differenciálással:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}.$$

Ezekkel a függvényekkel a véletlen hibák (lásd. 4.8.2-es fejezet) eloszlását tudjuk jellemezni.

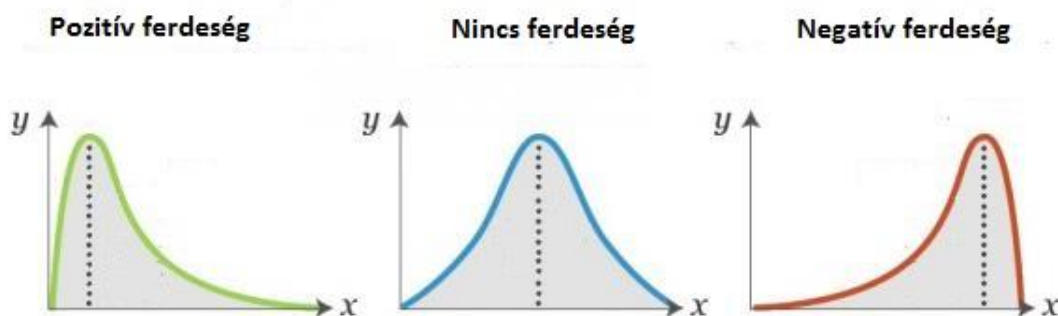
Mindkét függvény valószínűséget fejez ki. Annak a valószínűsége (lásd 4.9 ábra), hogy a valószínűségi változó a c és d intervallumhatárok közé esik

- az eloszlásfüggvényből: $F(d) - F(c)$;
- a sűrűségfüggvényből: $\int_c^d f(x)dx$.

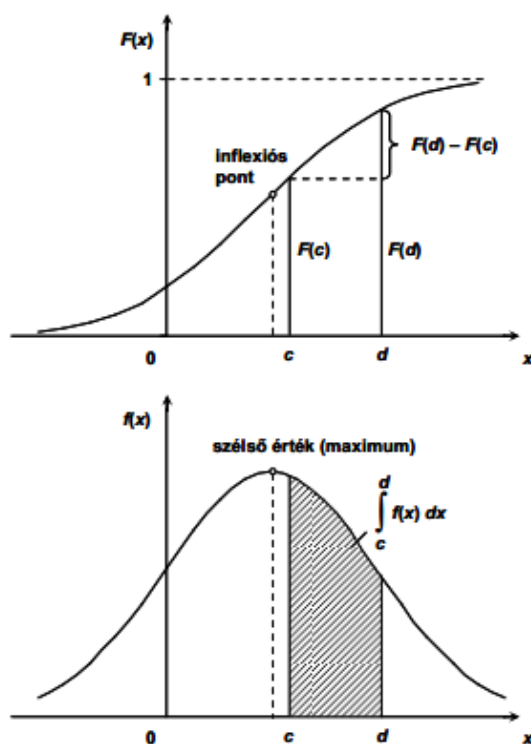
Sűrűségfüggvények jellemzésére két fogalmat vezettek be, ezek a ferdeség és a lapultság.

A *ferdeség* vagy *ferdeségi együttható* azt mutatja meg, hogy a sűrűségfüggvény mennyire nem szimmetrikus. A ferdeség jelölése nem egységes Magyarországon. Szokás β_1 -gyel vagy γ_1 -gyel jelölni, én a nemzetközi jelölést használva γ_1 -gyel jelölöm. Szemléletesen úgy lehet jellemezni a mutatót, hogy

- ha a szimmetrikushoz képest jobbra "nyúlik el" az eloszlás sűrűségfüggvény, akkor $\gamma_1 > 0$, azaz pozitív ferdeségről beszélünk,
- ha balra "nyúlik el", akkor $\gamma_1 < 0$, azaz negatív ferdeségről beszélünk,
- ha szimmetrikus az eloszlás, akkor a ferdeség nulla.



4.10 ábra. A ferdeség sematikus ábrázolása

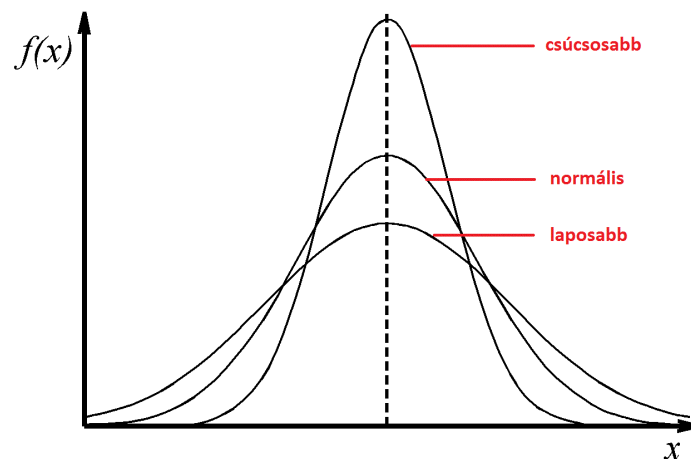


4.9 ábra. A valószínűségi változó eloszlás- és sűrűségfüggvénye [42]

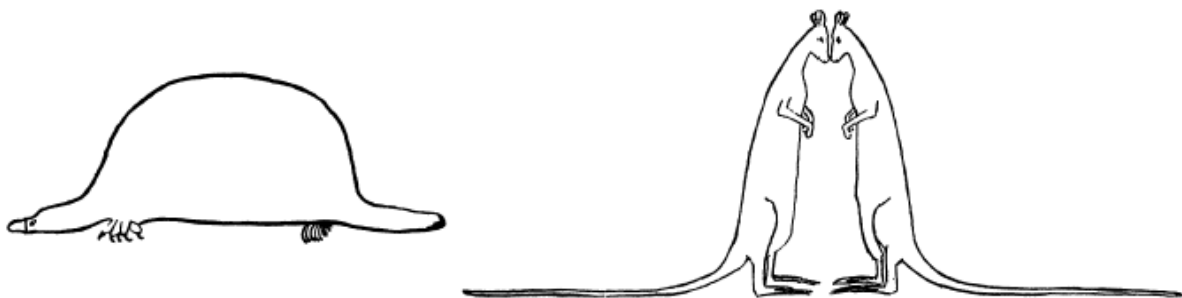
A *lapultság* vagy *lapultsági együttható* (vagy más forrásból csúcsosság vagy csúcsossági együttható) azt fogalmazza meg, hogy a sűrűségfüggvény "csúcsossága" vagy "lapossága" hogy viszonyul a normális eloszláséhoz. Jelölése nem egységes Magyarországon. Szokás β_2 -vel vagy γ_2 -vel jelölni, én a nemzetközi jelölést használva γ_2 -vel jelölöm. Szemléletesen úgy lehet jellemezni a mutatót, hogy

- normális eloszlás esetén $\gamma_2=0$,
- normális eloszlás sűrűségfüggvényénél "csúcsosabb" sűrűségfüggvényű eloszlások esetén $\gamma_2 > 0$, azaz pozitív lapultságról beszélünk,
- normális eloszlás sűrűségfüggvényénél "laposabb" sűrűségfüggvényű eloszlás esetén $\gamma_2 < 0$, azaz negatív lapultságról beszélünk.

1927-ben Student egyik ide kapcsolódó cikkében prezentálta a 4.12 ábrában megjelenített rajzokat. A csúcsosság (angolul *kurtosis*) fogalma memorizálásának megkönnyítésére kitalálta, hogy a laposabb (angolul *platykurtic*) sűrűségfüggvény egy kacsacsőrű emlősre (angolul *platypus*) hasonlít, míg a csúcsosabb (angolul *leptokurtic*) sűrűségfüggvény olyan, mint két egymásnak feszülő kenguru (erre a „lepping” szót használta, bár ilyen angol szó nincs; *Student* egyébként író volt, és William Sealy Gosset néven dolgozott a dublini Guinness sörgyárban vegyész statisztikusként).



4.11 ábra. A lapultság sematikus ábrázolása



4.12 ábra. Student-féle memóriarajzok [35]

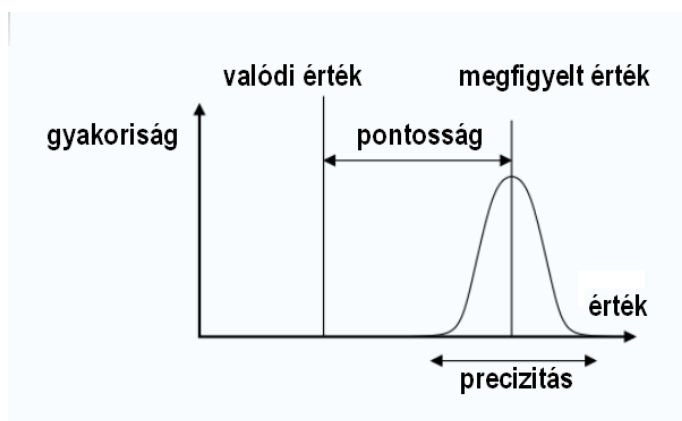
4.8.2 Metrológiai fogalmak [8,45]

A mérés arra irányuló tervszerű tevékenység, hogy valamely fizikai vagy kémiai mennyiség nagyságát a választott mértékegységben kifejezett számértékkel jellemezze. A mérésre vonatkozó ismeretek összességét *metrológiának*, azaz *méréstechnikának* nevezzük.

Minden mérési adat több-kevesebb hibával terhelt, ami azt jelenti, hogy egy adott kísérlet többször egymás után megismételve – a mért eredmények kisebb-nagyobb mértékben eltérnek egymástól, ún. szóródást mutatnak. Méréseink tehát mindig hibásak, és eredményeink megítélése szempontjából rendkívül fontos a mérési hiba nagyságának, és típusának ismerete.

Az Európai Községek Bizottsága a 96/23/EK jelű irányelvben rögzítette az analitikai módszerek elvégzése és az eredmények értelmezése terén használatos fogalmakat.

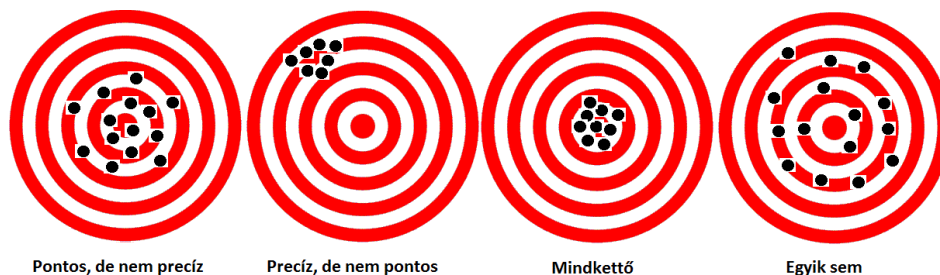
A *pontosság* és a *precizitás* két ellentmondó, egymást kiegészítő fogalom a metrológiában. A *pontosság* az, hogy mennyire közelíti meg valamely mérés eredménye a megfigyelt jelenség valódi értékét. Jól megfigyelhető a definíció jelentése a 4.13 ábrán. A mértékének megállapítására a szórás (s) számítását alkalmazzuk. A pontosságot az $\Delta = x_m \pm s$ alakban adhatjuk meg: $\Delta = x_m \pm s$. A pontosság növelhető a párhuzamosan elvégzett mérések számával.



4.13 ábra. A pontosság és precizitás sematikus kapcsolata

Precizitásról akkor beszélünk, ha változatlan feltételek mellett közel ugyanazon eredményeket kapjuk minden egyes méréskor, tehát a mérés reprodukálható. *Ismételhetőség* azt mutatja meg, hogy ugyanazt a vizsgálati mintát, ugyanaz a személy, azonos körülmények esetén más alkalommal milyen pontossággal tudja megmérni. *Reprodukálhatóság* pedig azt fejezi ki, hogy ugyanazt a vizsgálati mintát, azonos körülmények között más személy milyen precizitással méri meg.

A 4.14 ábra szemléletesen ábrázolja, hogy a mérés eredménye lehet pontos, de nem precíz; lehet precíz, de nem pontos; lehet mindkettő vagy egyik sem. Egy mérési rendszer akkor elfogadott, ha pontos és precíz is.



4.14 ábra. Pontosság és precizitás megjelenítése

A *torzítás* vagy *egzaktság* a mérési eredmények átlagának valamilyen módon rögzített referenciaértéktől, valós értéktől való eltérése. Jelenléte közvetlenül nem ismerhető fel a mérési eredményekből és nem csökkenthető a vizsgálatok számának növelésével. Számszerű adatát a mérés során akkor lehet meghatározni, ha ismert a valós érték. Az abszolútérték százalékában relatív hibaként szokták kifejezni:

$$a = 100 \cdot \frac{|x_{\text{valós}} - x_{\text{átlag}}|}{x_{\text{valós}}}$$

Szisztematikus hibát okozhat a mérés során használt készülékek és eszközök pontatlansága, a kísérleti körülmények helytelen megválasztása, illetve az eredmények helytelen értékelése. Ezek egy méréssorozatban minden eredményt azonos mértékben és irányban befolyásolnak, ezért is nehéz ezeket a hibaforrásokat felfedezni.

A *véletlen hibák* a véletlen megfigyelési és leolvasási hibákból, az objektív és szubjektív kísérleti feltételek kismértékű, ellenőrizhetetlen ingadozásából, egyes műveletek helytelen kivitelezéséből származnak. Ezek szabják meg a vizsgálat pontosságát, valamint az eredmények megismételhetőségét és reprodukálhatóságát. A véletlen hibák nagysága több mérés elvégzésével csökkenthető, mivel a számtani átlagban a hibák kompenzálják egymást.

4.8.3 Ismételhetőségi feltételek [1]

Az MSZ EN 12390-3:2002 szabvány tárgyalja a beton nyomószilárdság mérési eredményeinek megbízhatóságát az *ismétlési és az összehasonlítási feltételek* megadásával, olyan nyomószilárdság mérési kísérlet tapasztalatai alapján, amelyek során

- a mérési adatok a mintavétel, a próbakocka készítés, az utókezelés és a nyomószilárdság mérés bizonytalanságait tartalmazzák,
- a mérések 100 mm és 150 mm élhosszúságú próbakockákon végezték,
- a mért értékek összeférhetősége szempontjából megítélendő két vizsgálat mindegyike egy mérésből állt.

Az MSZ EN 12390-3:2002 szabványban található táblázat a megszilárdult beton nyomószilárdság mérésének megbízhatósági adatait tartalmazza a két kockaszilárdság átlagának százalékában, ha mind a két vizsgálat egy mérésből áll.

A vizsgált próbakockák élhosszúsága	Ismétlési feltételek [%]		Összehasonlítási feltételek [%]	
	Szórás	Terjedelem	Szórás	Terjedelem
100 mm	3,2	9,0	5,4	15,1
150 mm	3,2	9,0	4,7	13,2

A terjedelem és a szórás hányadosa, azaz a studentizált terjedelem (ha a tapasztalati szórást használjuk) vagy a standardizált terjedelem (ha a szórást a tényleges szórásnak tekintjük) értéke minden esetben 2,77.

A szabvány nyomószilárdság mérésre vonatkozó táblázat azt fejezi, ki, hogy

- ha egy laboráns az ismételhetőségi feltétel mellett, például 150 mm élhosszúságú próbakockákon két nyomószilárdság mérést végez, akkor azok eredménye abban az esetben összeférhető, ha a két mérés eredményének terjedelme az esetek 95 százalékában kisebb, mint a két mérésből számított átlagos kockaszilárdság 9,0 százaléka;
- ha két laboráns az összehasonlíthatóság feltételei mellett, 150 mm élhosszúságú próbakockákon egy-egy nyomószilárdság mérést végez, akkor azok eredménye abban az esetben összeférhető, ha a két mérés eredményének terjedelme az esetek 95 százalékában kisebb, mint a két mérésből számított átlagos kockaszilárdság 13,2 százaléka.

5. Saját vizsgálatok

5.1 Bevezetés

A vizsgálatokat laboratóriumi körülmények között végeztem, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékén. A laboratóriumi kísérleteket 2013. február és 2013. szeptember között folytattam.

Ebben a fejezetben bemutatom, hogy milyen anyagokon és milyen módszerekkel végeztem el a laboratóriumi vizsgálataimat.

5.2 Kutatási terv

5.2.1 Első kísérletsorozat

A laboratóriumi vizsgálataim első sorozatában a beton tömörítésének, a beton utókezelésének és a vizsgálati kornak a hatását tanulmányoztam. Ehhez laboratóriumban betont kevertem, a betonreceptúrában

szereplő összetevőket pontosan kimértem hitelesített mérleggel, majd fekvődobos betonkeverőben összekevertem az anyagokat. A beton keverésekor CEM I 42,5 N cementet használtam és igyekeztem a víz-cement tényezőt állandó, $v/c = 0,5$ értéken tartani. Mivel a kísérleteim során minden esetben szabványos nyomószilárdság vizsgálatot is végeztem, ezért a próbakockákat szabványos méretűre ($150 \times 150 \times 150$ mm) gyártottam. A próbakockákat háromféle tömörítéssel készítettem el (tömörítés vibroasztalon; tömörítés kézi erővel; nincs tömörítés), háromféle utókezelés mellett tároltam (víz alatt tárolás 7 napig; víz alatt tárolás 2 napig; nincs utókezelés) és két eltérő korban (28 napos kor; 240 napos kor) megvizsgáltam a felületi keménységüket, a nyomószilárdságukat és a karbonátosodás mélységét.

5.2.2 Második kísérletsorozat

A laboratóriumi vizsgálataim második sorozatában a karbonátosodási mélység, a nyomószilárdság és a visszapattnási érték között kerestem statisztikai kapcsolatot. Ehhez az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéken korábbi vizsgálatokból megmaradt, idősebb korú, 2-6 éves próbakockákat vizsgáltam meg. A betonok összetétele sok esetben ismeretlen volt, amely jól modellez egy valós feladatot is. A szerkezetek betonjának az összetételét általában nem ismerjük, amikor a helyszíni vizsgálatokat végezzük.

5.2.3 Harmadik kísérletsorozat

A laboratóriumi vizsgálataim harmadik sorozatában a vizsgáló eszközök saját bizonytalanságából, a vizsgálatot végző operátor mérési hibájából, illetve a vizsgált betonfelület nedvességtartalmából származó hatásokat tanulmányoztam. Vizsgálataimhoz háromféle vizsgáló eszközt (klasszikus N-típusú és L-típusú Schmidt-kalapácsok és Silver N-típusú Schmidt-kalapács), és az azokkal meghatározható négyféle mérőszámot (R_N és R_L értékek a klasszikus Schmidt-kalapácsokkal, illetve Q és R értékek a Silver Schmidt-kalapáccsal) tanulmányoztam. A vizsgálatot végző operátorok száma három volt. A vizsgált nedvességtartalmi állapotok száma kettő volt (légszáraz és víztelített).

5.3. Vizsgálati módszerek

5.3.1 A Schmidt-kalapácsos vizsgálat

A Schmidt-kalapácsos vizsgálatokat a próbakockákon úgy végeztem el, hogy azok közben törőgéphez be voltak fogva. A méréssorozatok előtt és után a felhasznált Schmidt-kalapácsok visszapattnási értékeit kalibráló üllőn megvizsgáltam. Kalibrálnak tekintettem az eszközöket, ha 10 ütésből álló vizsgálat során rendre az adott vizsgáló eszközhöz tartozó visszapattnási értékeket kaptam. Ez az N-típusú kalapács esetén 81 ± 2 , az L-típusú kalapács esetén 75 ± 2 . A kalapácsok kalibrálása után előkészítettem a próbatesteket a vizsgálatokra, a próbatesteket két párhuzamos, csuklós acél nyomólap közé szorítottam be, hogy a mérések alatt ne mozduljanak el. Ügyeltem, hogy a próbatesteket folyamatos kb. 25 kN nyomóerő

szorítsa. A mérések során a próbatestek legalább két, egymással párhuzamos oldalán oldalanként legalább 10-10 darab, vízszintes irányú ütést végeztem.

5.3.2 A nyomószilárdság vizsgálata

Minden vizsgálatot megelőzően ellenőriztem a próbatestek méreteit, tömegét és a felületi állapotukat. A méretek ellenőrzéséhez Powerfix gyártmányú digitális tolómérőt használtam, amellyel 0,1 mm pontosság érhető el. A tömeget egy 0,01 kg pontosságú digitális mérleg segítségével mértem meg. Az így kapott adatokból meghatározható a próbatestekhez tartozó *testsűrűség*, ami a tömeg és a térfogat hányadosa, azaz: $\rho = \frac{m}{V}$. Mértékegysége kg/m³.

A nyomószilárdság vizsgálatához a szabványos próbakockákat használtam a felületi keménységmérést követően. A vizsgálatához az 5.1 ábrán bemutatott Alpha 3-3000S gyártmányú 3000 kN kapacitású hidraulikus törőgépet használtam. A vizsgálat előtt a nyomófelületet minden esetben gondosan letakarítottam, majd a próbatesteket a nyomólapok középre igazítottam. Ezt követően a kockákat törésig terheltem, majd a gép digitális kijelzőjéről leolvastam a töréshez szükséges erő (F_{max}) nagyságát kN-ban. Az

$f_{cube} = \frac{F_{max}}{A}$ képletet használva meghatároztam a nyomószilárdságot N/mm² mértékegységben.



5.1 ábra. A beton nyomószilárdságának vizsgálata

5.3.3 A karbonátosodási mélység vizsgálata

A nyomószilárdság vizsgálatát követően egy hasító gép segítségével két részre hasítottam a próbakockákat, hogy lehetővé váljon a Schmidt-kalapácsokkal vizsgált oldalak karbonátosodásának a megfigyelése. A törésfelületekre egyenletesen fenolftalein oldatot porlasztottam, hogy kirajzolódjon a 9 pH érték határa. Ilyen határok kirajzolódása látható az 5.2 ábrán. A felületek kezelését követően egy digitális tolómérő

segítségével lemértem a beton karbonátosodásának mélységét, igyekezve a lehető legsűrűbben (3-5 milliméterenként) leolvasni, így élenként sikerült legalább 30-40 mérést végezni, tehát vizsgált laponként legalább 60-80 mérés áll rendelkezésre.



5.2 ábra. Három különböző karbonátosodási mélységű vizsgált próbatest

6. Eredmények és értékelésük

A TDK dolgozatom mellékletében megadott részletes mérési adatsorok és statisztikai elemzések egyes eredményeit összefoglalóan a 6.1 és 6.2 táblázatokban adom meg, külön az ismert összetételű, 28-240-1100 napos korú betonokra, és külön az ismeretlen összetételű, 2-6 éves korú betonokra vonatkozóan. Ennek a fejezetnek az első részében 68 darab szabványos próbakockán mért eredményeimet értékelem ki. A kiindulási adatok száma: 7552 darab karbonátosodási mélység leolvasás, 1968 darab visszapattanási érték leolvasás N-típusú Schmidt-kalapáccsal, 1931 darab visszapattanási érték leolvasás L-típusú Schmidt-kalapáccsal, 494 darab R érték és 482 darab Q érték leolvasás N-típusú Silver Schmidt-kalapáccsal, 68 darab beton testűrűség érték és 57 darab beton nyomószilárdság érték.

6.1 táblázat. Ismert összetételű betonokon mért eredmények összefoglalása

	$R_{N,m}$	s_R	$V_R, \%$	r_R	$\zeta_R, \%$	θ_R	$x_{cm},$ mm	$s_{xc},$ mm	$V_{xc} \%$	f_c, MPa
U2_28	36,54	3,243	8,876	12	32,84	3,700	—	—	—	49,16
U4_28	36,50	3,171	8,687	13	35,62	4,100	—	—	—	45,91
U6_28	40,13	3,615	9,010	12	29,91	3,319	—	—	—	59,51
U8_28	40,21	3,611	8,982	13	32,33	3,600	—	—	—	59,47
U9_28	41,09	2,369	5,764	9	21,90	3,800	—	—	—	55,73
U10_28	37,43	2,420	6,466	8	21,37	3,306	—	—	—	54,13
K1_28	41,15	3,689	8,964	15	36,45	4,066	—	—	—	50,89
K4_28	44,19	2,960	6,698	10	22,63	3,378	—	—	—	48,40
D3_28	41,57	2,039	4,905	9	21,65	4,414	—	—	—	55,07
D4_28	42,50	1,762	4,146	8	18,82	4,540	—	—	—	57,64

a táblázat folytatódik

6.1 táblázat folytatása

	R _{N,m}	s _R	V _R , %	r _R	□ R, %	□ R	x _{cm} , mm	s _{xc} , mm	V _{xc} %	f _c , MPa
V1_28	41,23	5,014	12,161	17	41,23	3,391	–	–	–	59,11
V2_28	41,78	2,628	6,289	11	26,33	4,186	–	–	–	58,22
U1_240	42,88	4,857	11,329	17	39,65	3,500	6,597	1,045	15,84	49,82
U3_240	40,73	4,233	10,395	14	34,38	3,307	5,222	1,499	28,71	51,69
U5_240	41,65	3,393	8,145	14	33,61	4,127	4,944	1,535	31,04	52,22
U7_240	47,45	2,365	4,984	10	21,07	4,228	2,796	0,550	19,67	67,24
U12_240	45,05	4,445	9,868	15	33,30	3,374	4,983	2,028	40,71	62,18
U13_240	45,50	3,277	7,202	14	30,77	4,272	2,736	0,908	33,17	62,71
K3_240	48,04	2,116	4,404	8	16,65	3,781	2,337	0,748	32,02	59,02
K5_240	46,54	3,148	6,764	12	25,78	3,812	3,310	1,075	32,47	55,78
D2_240	48,00	2,064	4,300	8	16,67	3,876	3,449	1,084	31,43	63,16
D5_240	47,38	2,281	4,814	10	21,11	4,385	3,095	1,139	36,82	66,18
V3_240	48,79	2,395	4,909	10	20,50	4,175	3,095	0,780	25,22	69,87
V5_240	49,13	2,817	5,734	12	24,42	4,260	3,188	1,151	36,10	69,07
Tri.1B	48,45	2,987	6,165	14	28,90	4,687	8,610	1,807	20,99	48,26
Tri.2A	51,42	1,348	2,622	5	9,72	3,708	4,688	1,608	34,29	70,87
Tri.3A	49,85	2,887	5,792	11	22,07	3,810	–	–	–	82,34

6.2 táblázat. Ismeretlen összetételű betonokon mért eredmények összefoglalása

	R _{N,m}	s _R	V _R , %	r _R	ζ _R , %	θ _R	x _{cm} , mm	s _{xc} , mm	V _{xc} %	f _c , MPa
H1	44,80	3,302	7,371	11	24,55	3,331	12,204	1,622	13,29	–
H2	44,65	2,907	6,510	9	20,16	3,096	–	–	–	–
H3	46,55	2,837	6,095	11	23,63	3,877	12,451	1,493	11,99	–
H4	44,25	2,573	5,814	10	22,60	3,887	12,899	1,577	12,23	–
H5	45,25	3,697	8,171	16	35,36	4,327	10,932	1,895	17,34	–
H6	45,00	3,479	7,732	11	24,44	3,162	–	–	–	–
H7	48,95	2,460	5,025	11	22,47	4,472	12,461	1,174	9,42	–
H8	49,20	3,518	7,151	15	30,49	4,263	–	–	–	–
H9	50,90	2,382	4,680	10	19,65	4,198	12,819	1,397	10,90	–
H10	49,85	3,422	6,865	16	32,10	4,675	12,133	1,907	15,72	–
H11	47,30	3,496	7,391	14	29,60	4,005	12,159	1,505	12,37	–
IP1	50,95	1,761	3,457	7	13,74	3,974	–	–	–	75,73
IP2	52,15	1,981	3,798	7	13,42	3,534	–	–	–	87,29
IP3	52,45	2,212	4,217	8	15,25	3,617	–	–	–	74,49
IP4	52,40	1,501	2,864	5	9,54	3,331	–	–	–	74,62
IP5	51,80	2,016	3,891	7	13,51	3,473	–	–	–	75,07
DD1	50,80	2,191	4,313	9	17,72	4,108	9,252	1,713	18,52	60,62
DD2	52,15	2,231	4,278	8	15,34	3,586	7,254	1,146	15,79	62,93
DD3	49,35	2,498	5,062	9	18,24	3,603	9,471	1,901	20,07	61,38
DD4	50,00	2,991	5,982	12	24,00	4,012	9,710	1,753	18,05	61,29
SZ1	49,40	1,353	2,740	5	10,12	3,695	7,391	1,309	17,71	59,96
SZ2	51,10	3,177	6,218	16	31,31	5,036	9,851	1,428	14,49	58,53
VZ1	46,70	2,867	6,140	10	21,41	3,488	14,522	1,278	8,80	57,78
VZ2	46,85	4,902	10,463	17	36,29	3,468	15,257	1,539	10,09	54,27

a táblázat folytatódik

6.2 táblázat folytatása

Ö1-1	47,10	1,410	2,995	5	10,62	3,545	6,359	1,514	23,80	69,51
Ö1-2	46,50	2,013	4,329	8	17,20	3,974	6,627	1,486	22,42	73,64
Ö1-3	47,05	2,502	5,318	14	29,76	5,595	7,012	1,777	25,34	68,89
Ö1-4	46,80	1,322	2,825	4	8,55	3,026	6,556	1,527	23,29	73,51
Ö1-5	47,85	2,323	4,855	10	20,90	4,304	8,892	1,016	11,43	72,67
Ö1-6	46,05	2,438	5,295	11	23,89	4,512	8,426	1,515	17,98	69,29
Ö1-7	46,30	1,867	4,032	6	12,96	3,214	5,923	2,027	34,23	71,73
Ö1-8	47,40	1,957	4,130	9	18,99	4,598	8,203	1,311	15,98	75,47
Ö2-1	48,90	2,360	4,826	8	16,36	3,390	9,222	1,751	18,99	66,58
Ö2-2	47,55	1,572	3,306	6	12,62	3,817	8,806	1,680	19,08	68,22
Ö2-3	48,35	2,390	4,944	8	16,55	3,347	9,231	1,342	14,54	68,04
DS1	48,85	2,434	4,982	10	20,47	4,109	9,188	2,134	23,23	63,91
DS2	49,50	3,317	6,700	15	30,30	4,523	11,250	1,314	11,68	64,76
DS3	41,10	2,573	6,261	10	24,33	3,886	16,883	1,390	8,23	59,38
DS4	46,65	4,095	8,777	16	34,30	3,908	12,085	2,048	16,95	59,02
DS5	48,80	4,188	8,581	17	34,84	4,060	12,537	1,189	9,49	60,71
DS6	49,05	3,845	7,840	16	32,62	4,161	10,341	1,309	12,66	61,38

6.1 Karbonátosodás mélységének vizsgálata

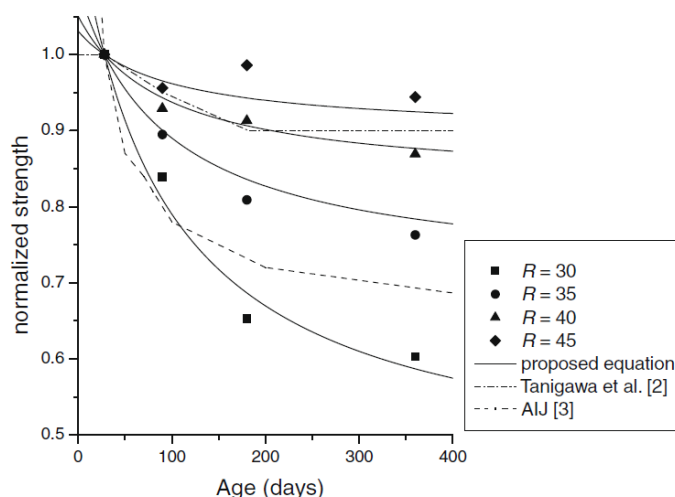
A karbonátosodás mélységének vizsgálatát több szempontból is fontosnak tartottam. Egy részről, a beton karbonátosodása következtében a felületi keménység a szakirodalmi megfigyelések szerint megnő, azonban ennek a mértékére vonatkozóan kevés részletes tanulmány található a szakirodalomban, és az a kevés publikáció is tartalmaz ellentmondásos adatokat. Más részről, a roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek statisztikai értékelésének jellegéből adódóan a karbonátosodás mélységének valószínűségi eloszlása fontos kiindulási adat lehet, és erre vonatkozóan sem található a szakirodalomban részletes tanulmány. Harmadrészt, a karbonátosodás mélysége a beton kapilláris porozitásától függő, időben változó állapotjelző, így a nyomószilárdság becslése során hasznos lehet ennek megmérése egy ismeretlen korú és ismeretlen összetételű beton esetén. Negyedrészt, a szakirodalomban található utalásokat a beton nyomószilárdsága és a karbonátosodás mélysége közötti kapcsolatra saját vizsgálataimmal is szerettem volna ellenőrizni.

Az ide vonatkozó legfontosabb szakirodalmi adatokat összefoglalom a következőkben.

A felületi keménység (Schmidt-kalapácsos visszapattanási érték), a nyomószilárdság és a karbonátosodás mélysége közötti kapcsolatra vonatkozóan egy koreai szerzőktől származó folyóiratcikket [36], egy kínai szabványt [37] és a témavezetőim kutatásainak eredményeit [38] említtem meg. Kim és szerzőtársai [36] olyan formulát javasoltak a fenti három hatás figyelembe vételére, amely egy tapasztalati képlet alapján a beton kora (t) és egy referencia visszapattanási érték (R) alapján a nyomószilárdságra egy módosító szorzót eredményez. A képlet alakja:

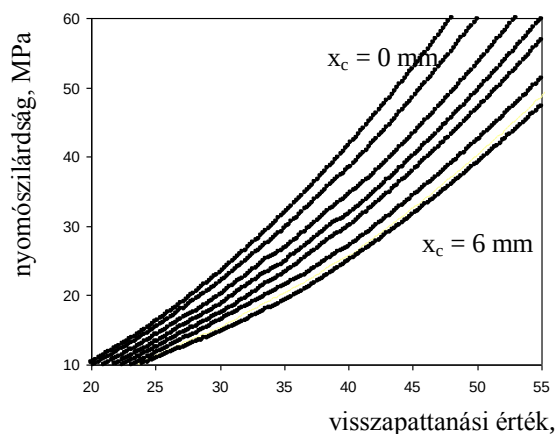
$$\alpha(R, t) = 1 - \frac{0.3064}{(R/34.7)^{4.2}} \left(\frac{t - 28}{t + 94} \right)$$

A kutatók vizsgálatainak egyik eredményét a 6.1 ábrán mutatom be.



6.1 ábra. Beton korának figyelembe vétele felületi keménység alapján történő nyomószilárdság becslés esetén [36]

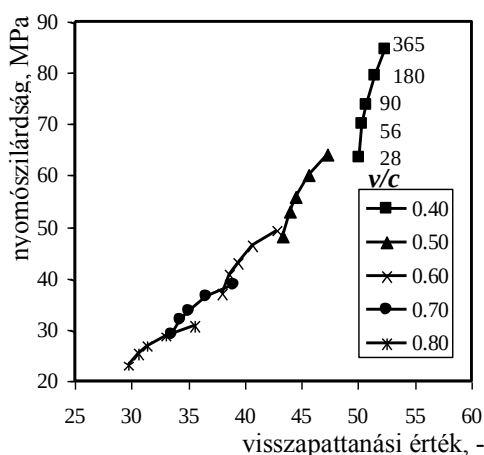
A bemutatott összefüggés hátránya, hogy 400 napos kor után a használhatóságát a szerzők nem igazolják, így idősebb betonszerkezetekre nem alkalmazható. A JGJ/T23-2001 jelzetű kínai szabványban táblázatos formában jelenítik meg a felületi keménység, a nyomószilárdság és a karbonátosodás mélysége közötti kapcsolatot [37]. A táblázatok alapján megrajzolható diagramot a 6.2 ábrán mutatom be.



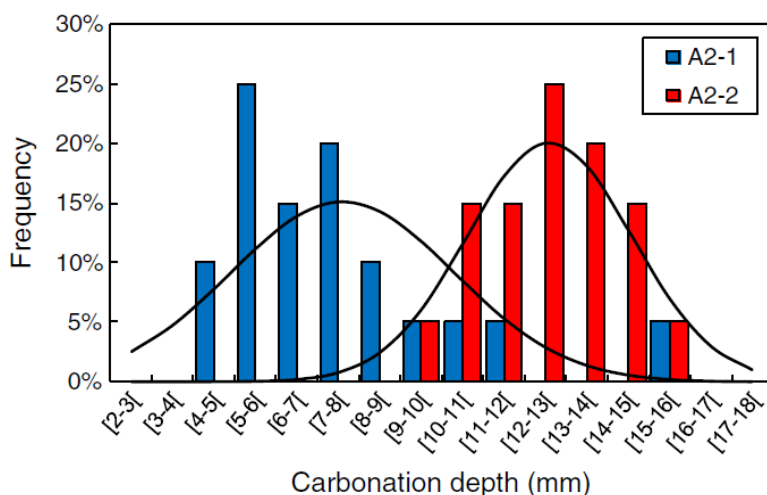
6.2 ábra. Beton karbonátosodásának figyelembe vétele felületi keménység alapján történő nyomószilárdság becslés esetén [37 alapján]

Szilágyi, Borosnyói és Zsigovics [38] ismertetik a szakirodalomban azt a működési modellt, amely a felületi keménység és a beton nyomószilárdsága, mint időtől függő változók között az elvi kapcsolatot egyértelműen megadja oly módon, hogy abban a karbonátosodás hatása közvetlenül megjelenik és jól követhető. A szerzők általános alakban, tizenkét empirikus paraméter bevezetésével írják föl a kapcsolatot, amely közvetlen gyakorlati használatra nem alkalmas, azonban feltárja azokat a belső kapcsolódáso-

kat, amelyek az időtől függő változók között feltételezhetők. Egy numerikus szimulációjuk eredményét a 6.3 ábrán szemléltetem. Az ábrán öt eltérő v/c tényezőhöz, és 28-56-90-180-365 napos korhoz tartozó, nyomószilárdság- visszapattanási érték, $f_c(t)$ - $R(t)$ értékpárok vannak feltüntetve elméleti megfontolások, és a szerzők által kifejlesztett modell alapján. Megfigyelhető, hogy a nagy, $v/c = 0,80$ víz-cement tényezőjű, nagy porozitású, erőteljesen karbonátosodó, kis szilárdságú beton esetén időben számottevő mértékű változás következik be a felületi keménységben, amelyet a nyomószilárdság enyhe növekedése követ. Ezzel szemben, a kis, $v/c = 0,40$ víz-cement tényezőjű, kis porozitású, csekély/elhanyagolható mértékben karbonátosodó, nagy szilárdságú beton esetén időben alig növekszik a felületi keménység, azonban eközben a nyomószilárdság fejlődése számottevő. Ez a jelenség nagyon megnehezíti az idősebb betonszerkezetek Schmidt-kalapácsos szilárdságbecslését, mert a nagyobb felületi keménységet nem csak a nagyobb nyomószilárdság, hanem az előrehaladottabb karbonátosodás is eredményezheti.



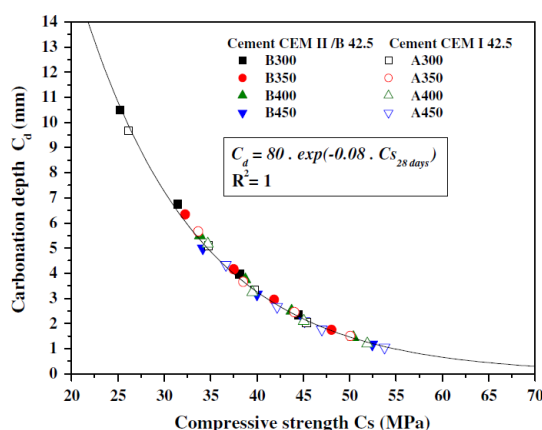
6.3 ábra. Beton nyomószilárdságának és felületi keménységének modellezése [38]



6.4 ábra. Karbonátosodás mélységének relatív gyakorisága szerkezetekben [40]

A karbonátosodás mélységének valószínűségi eloszlására vonatkozóan *Ait-Mokhtar* és szerzőtársai cikkét [40] és a **fib** Model Code for Service Life Design kiadványt [43] idézem. A francia szerzőcsoport betonszerkezetek helyszíni vizsgálatai alapján a karbonátosodási mélység valószínűségi eloszlására a normális eloszlást javasolja (6.4 ábra). Az általuk vizsgált tartományban a karbonátosodási mélység relatív szórása 12%-37% volt. A **fib** MC-SLD a karbonátosodási mélység valószínűségi eloszlására szintén a normális eloszlást javasolja.

A karbonátosodás mélysége és a nyomószilárdság között közvetlen kapcsolatot ritkán mutatnak be a szakirodalomban. Egy ilyen összefüggést találunk algériai szerzők cikkében [39] a 28 napos nyomószilárdság és a 180 napos korban kialakuló karbonátosodási mélység között (6.5 ábra). Bár a bemutatott összefüggésnek csekély a közvetlen gyakorlati haszna, de az erős korrelációjú exponenciális közelítő függvény rávilágít a két jellemző erős kapcsolatára.



6.5 ábra. Karbonátosodási mélység és nyomószilárdság kapcsolata [39]

Saját laboratóriumi méréseimet részletesen feldolgoztam, a statisztikai jellemzőket meghatároztam, és azokat dolgozatom mellékletében lehet megtalálni. A 6.6 és 6.7 ábrákon diagramok segítségével igyekszem feltárni a karbonátosodási mélység szóródási jellemzői (terjedelem, szórás, relatív szórás) és a karbonátosodási mélység valószínűségi eloszlása közötti kapcsolatokat.

A karbonátosodási mélység valószínűségi eloszlására a 6.6 és 6.7 ábrák, valamint a dolgozat mellékletében bemutatott statisztikai elemzések alapján a következő megállapításokat lehet tenni:

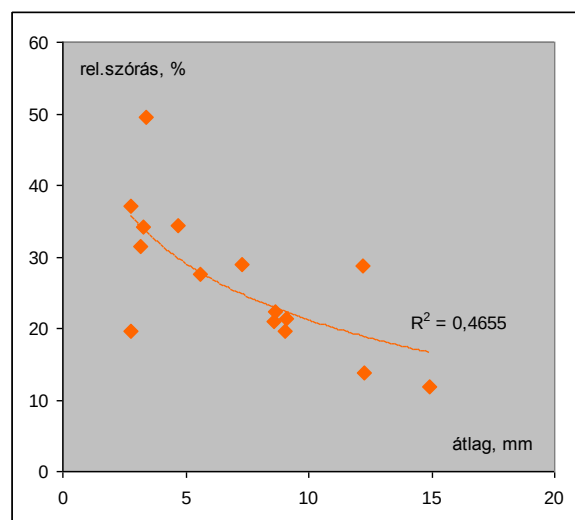
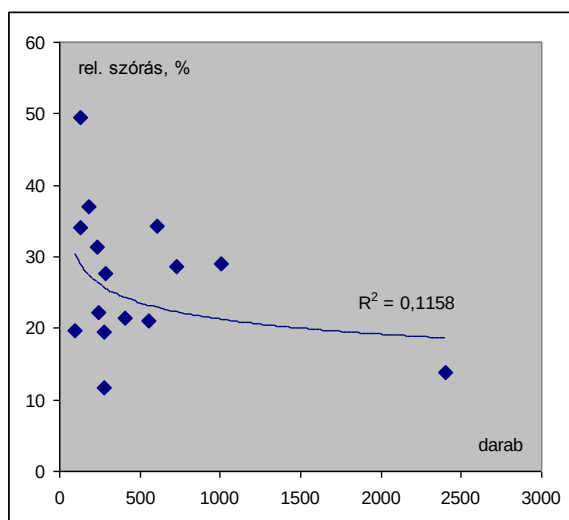
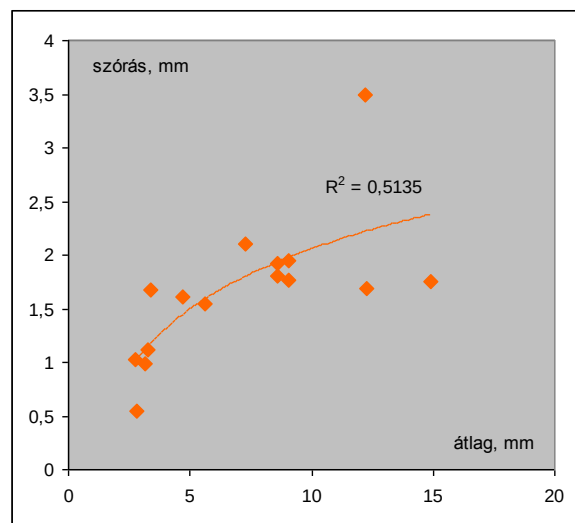
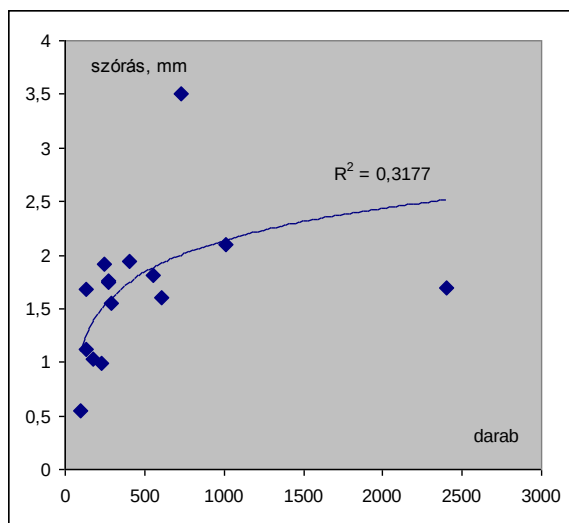
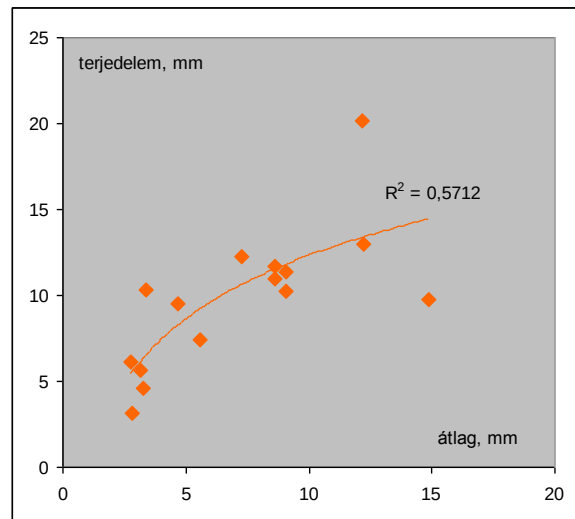
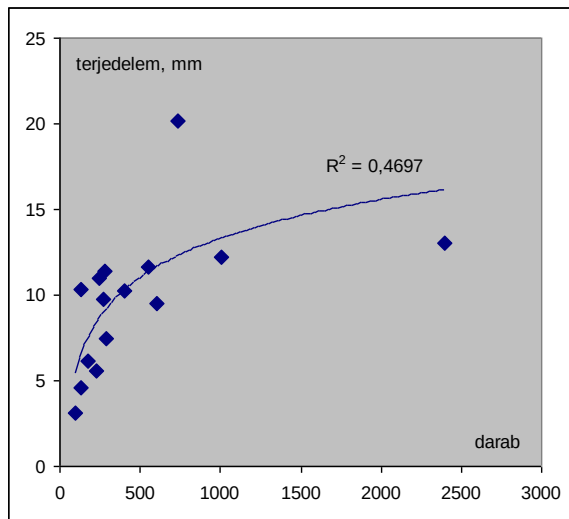
- 200 körüli leolvasási szám alatt a karbonátosodási mélység valószínűségi eloszlása nem tekinthető normális eloszlásúnak, esetenként számottevő a (pozitív előjelű) ferdeség,
- 500 fölötti leolvasási szám esetén a karbonátosodási mélység valószínűségi eloszlása csaknem normális eloszlásúnak tekinthető, a ferdeség és a csúcosság zérus közeli,
- megfigyelhető összefüggés a karbonátosodási mélység szóródási jellemzői (terjedelem, szórás, relatív szórás) és a karbonátosodási mélység valószínűségi eloszlása között: általában a nagyobb relatív szórás esetén a valószínűségi eloszlás erőteljesebben eltér a normális eloszlástól.

Megfigyeléseimet összehasonlítva a szakirodalmi adatokkal, egy részről megnyugtató egyezést találok a publikált tapasztalatokkal, más részről a mások által leírtak kiegészíthetők, pontosíthatók a megfigyeléseim alapján. Természetesen a mindössze néhány tucat próbatesten elvégzett néhány ezer leolvasásból nem szabad messzemenő következtetéseket levonni, de nagyon örömtelinek találtam, hogy a kérdések részbeni megválaszolása mellett jövőbeni kutatási irányokat is ki tudok jelölni magamnak.

Érdekes megállapítást lehet ugyanis tenni, ha a karbonátosodási mélység átlagos értéke és a karbonátosodási mélység szóródási jellemzői (terjedelem, szórás, relatív szórás) között vizsgáljuk a közvetlen összefüggéseket. Megfigyelhető, hogy ha a karbonátosodási mélység átlagos értéke nő, akkor a szóródási jellemzők értékei is nőnek (6.6 ábra). Ezen a területen további kutatást lesz célszerű folytatni annak kiderítésére, hogy ezt a jelenséget vajon melyik betontechnológiai paraméter befolyásolhatja, ugyanis a betonok nyomószilárdsága esetén ilyen jelenséget nem lehet megfigyelni: a beton nyomószilárdságának a szóródási jellemzői nem függenek a beton nyomószilárdságának átlagos értékétől, hanem a betonkészítés minőségétől függően konstans értéket vesznek fel. A 6.6 ábrán bemutatott adatokat a 6.8 ábrán szétbontottam a 6.1 és 6.2 táblázatok szerinti, ismert összetételű 240-1100 napos korú és ismeretlen összetételű 2-6 éves korú betonok csoportjára. A csoportosításban a vizsgált egyedek jól elkülönülnek egymástól.

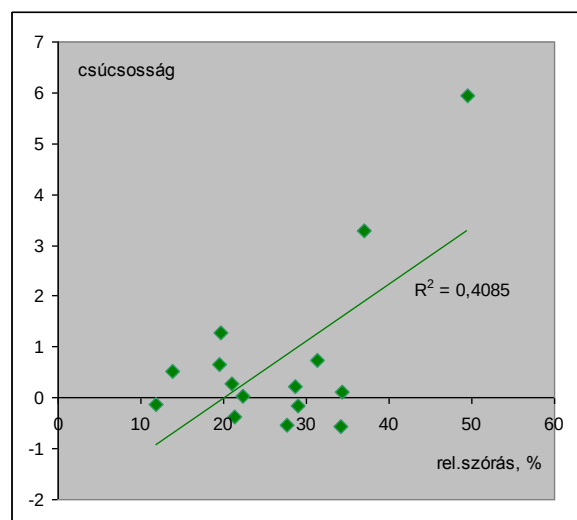
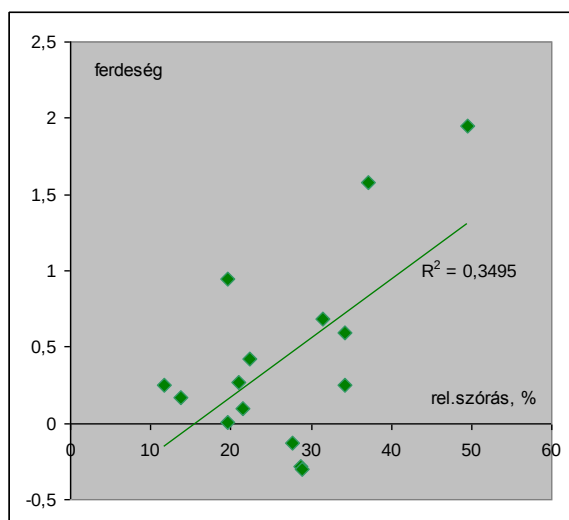
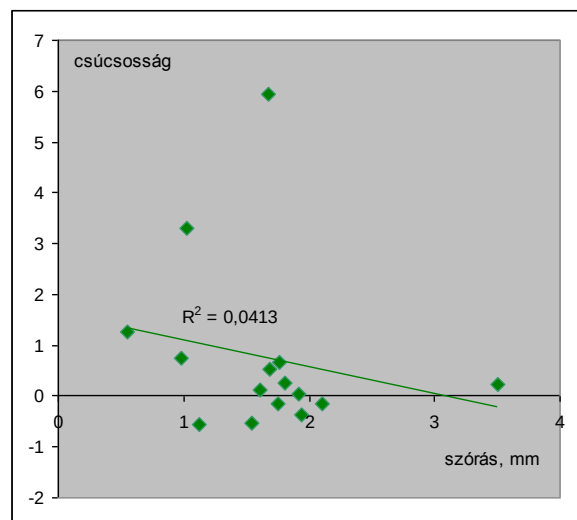
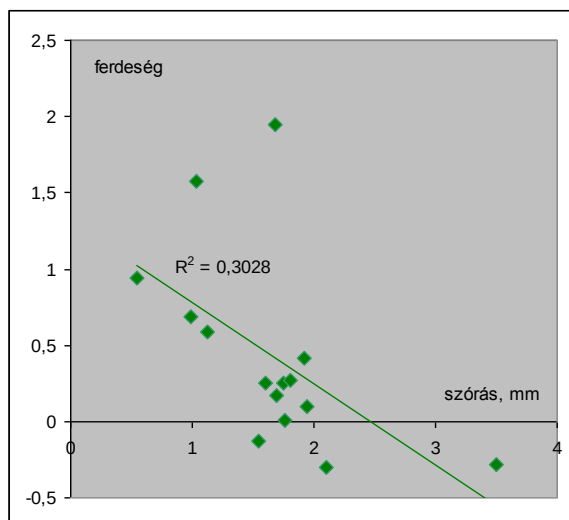
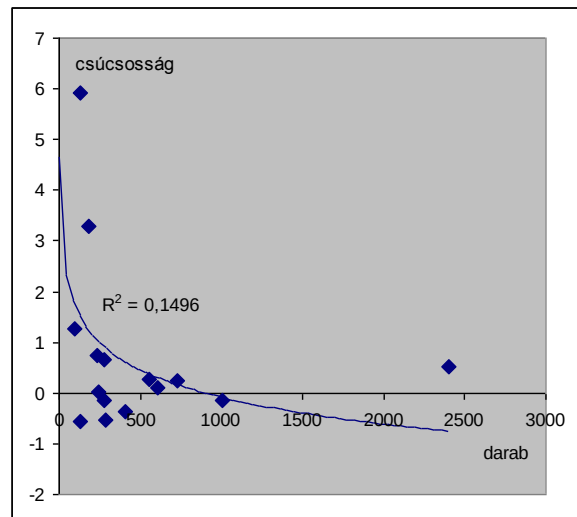
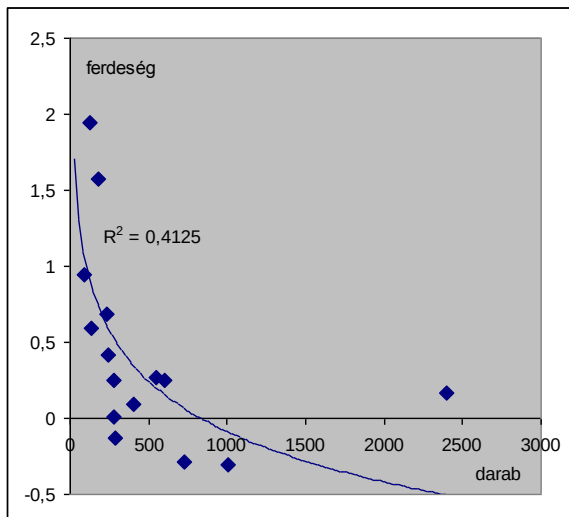
Egy speciális szóródási jellemző a studentizált terjedelem, amely a terjedelem és a szórás hányadosa. A 6.9 ábrán ezt jelenítem meg az adott mérésekre vonatkozó leolvasások száma, illetve a karbonátosodási mélység átlagos értéke függvényében. A 6.9 ábra szerint a két szóródási jellemző nem ugyanolyan ütemben változik a két vizsgált paraméter függvényében. A jelenség pontosabb tisztázása további jövőbeni elemzést igényel.

Ha a karbonátosodás mélységének a mérését arra kívánjuk fölhasználni, hogy a helyszíni keménységmérés megbízhatóságát növeljük, akkor szükségünk lehet olyan összefüggések vizsgálatára, amelyek a különböző korú betonok nyomószilárdságát és a karbonátosodás mélységét jelenítik meg. Ilyen diagramot állítottam elő a 6.10 ábrán. A 6.10 ábrán az adatokat ismételten szétbontottam a 6.1 és 6.2 táblázatok szerinti, ismert összetételű 240-1100 napos korú és ismeretlen összetételű 2-6 éves korú betonok csoportjára. A csoportosításban a vizsgált egyedek határozottan elkülönülnek egymástól. Figyelemre méltó, hogy a megrajzolt trendvonalak hatványkitevői csaknem azonos értékűek. Az eredmények alapján feltételezhető, hogy a jelenségre egy szélesebb idő intervallumot választva görbesereg konstruálható (6.11 ábra), amennyiben a környezeti feltételek azonosak. Az általam vizsgált esetekben ez utóbbi követelmény teljesült, mert valamennyi általam megvizsgált próbatest laboratóriumi körülmények között volt tárolva.



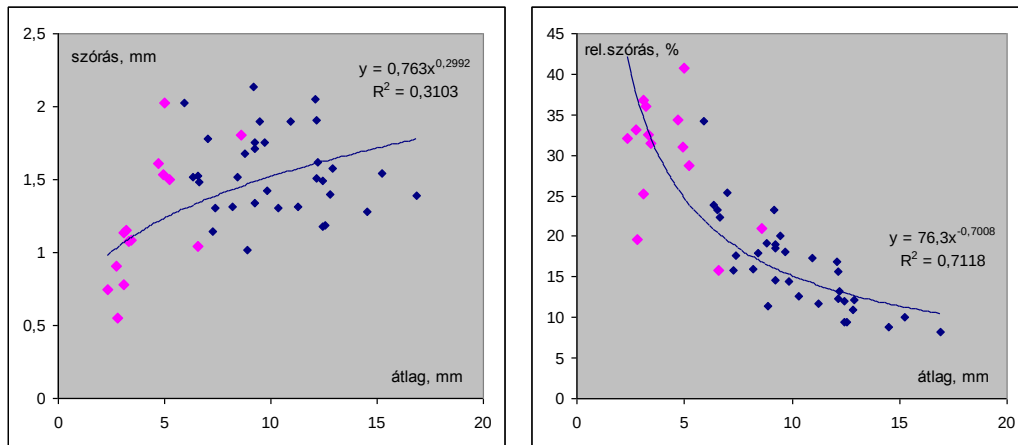
6.6 ábra.

A karbonátosodási mélység szóródási jellemzőinek (terjedelem, szórás, relatív szórás) függése a darabszámtól és az átlagos karbonátosodási mélységtől



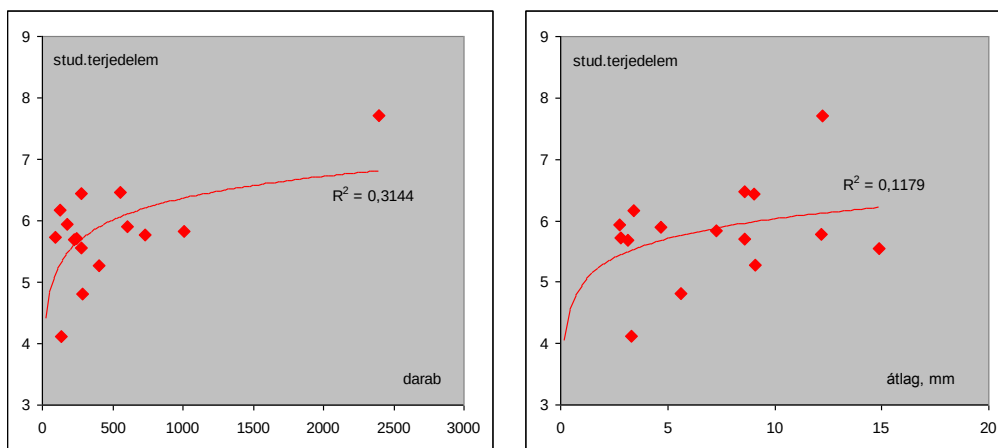
6.7 ábra.

A karbonátosodás mélységének a normális eloszlástól való eltérését szemléltető statisztikai paraméterek (ferdeség és csúcsosság) függése a darabszámtól és a szóródási jellemzőktől



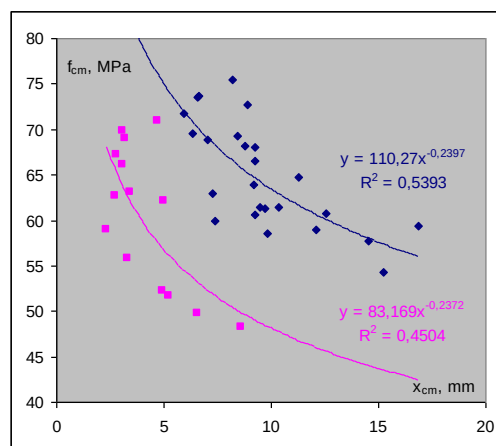
6.8 ábra.

A karbonátosodási mélység szórásának és relatív szórásának függése az átlagtól



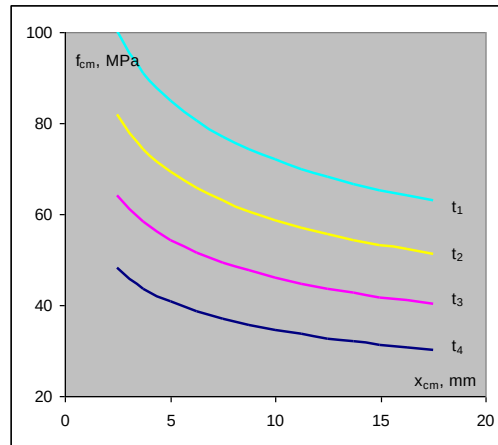
6.9 ábra.

A karbonátosodási mélység studentizált terjedelmének változása az átlag és a leolvasási darabszám függvényében



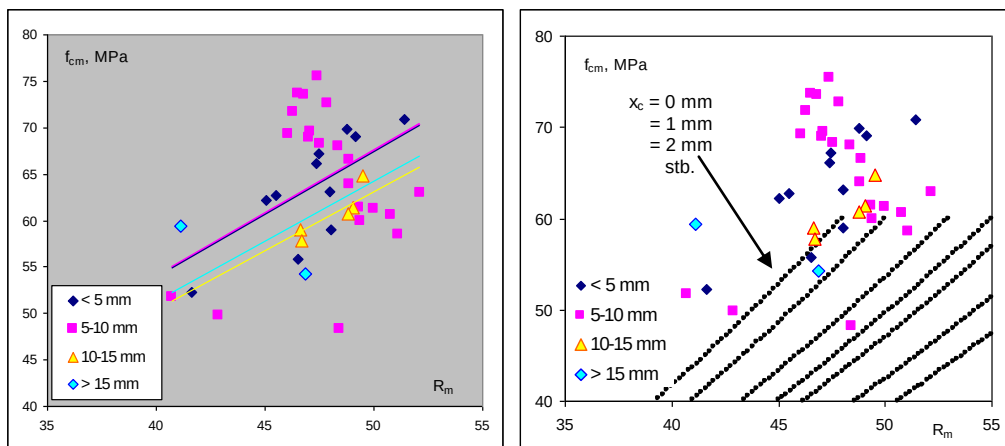
6.10 ábra.

A karbonátosodás átlagos mélysége és a nyomószilárdság kapcsolata



6.11 ábra.

Elvi görbesereg a karbonátosodás átlagos mélysége és a nyomószilárdság kapcsolatára, azonos tárolási körülmények feltételezése mellett



6.12 ábra.

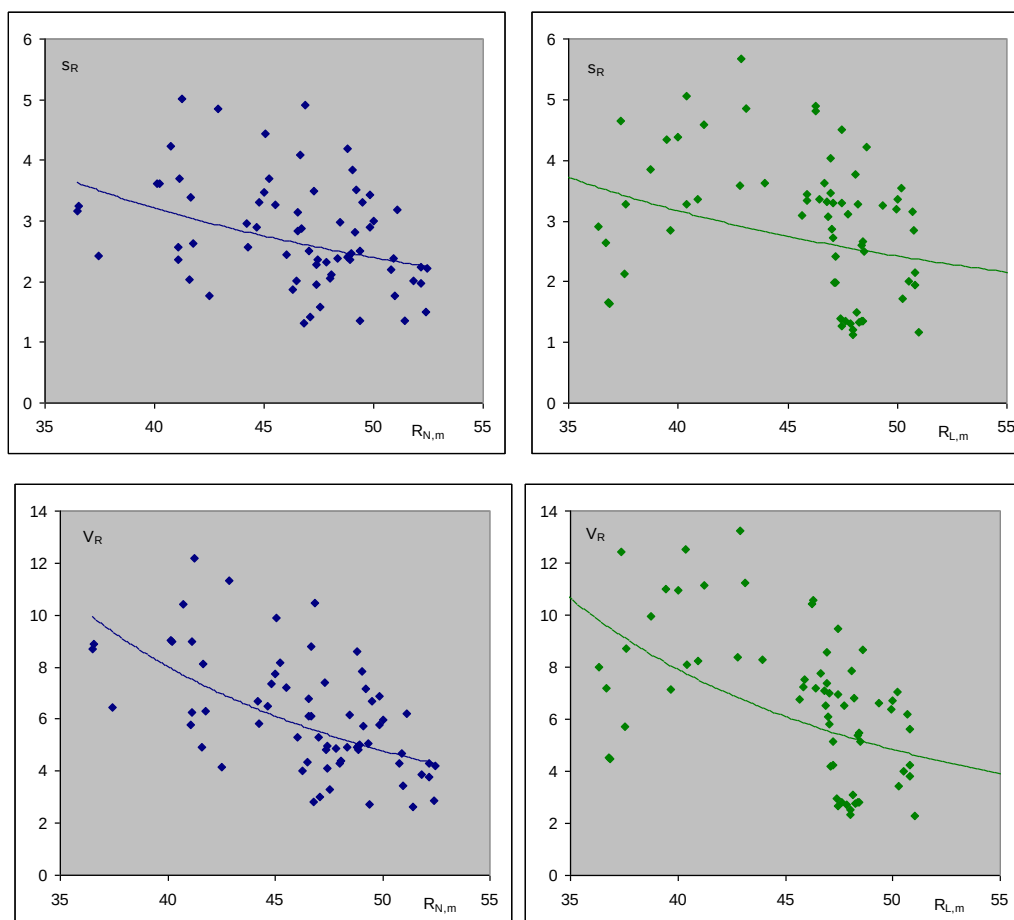
Mérési eredmények összehasonlítása a JGJ/T23-2001 szabvány javaslatával

Mérési eredményeimet a 6.12 ábrán összehasonlítottam a 6.2 ábrán bemutatott, JGJ/T23-2001 szabvány alapján fölrajzolható görbesereggel. Több megfigyelés is tehető. Az egyik az, hogy a karbonátosodási mélységnek valóban van egy olyan megfigyelhető hatása, amelyre a szabvány utal, azaz az eltérő karbonátosodási mélységhez tartozó trendvonalak szétválnak, és a nagyobb karbonátosodási mélységhez tartozó vonalak a koordináta rendszerben lejjebb helyezkednek el, mint a kisebb karbonátosodási mélységhez tartozó trendvonalak. Mérési eredményeim azonban nem esnek abba a tartományba, amelyet a szabvány a táblázataiban lefed, sem a nyomószilárdság tekintetében (az általam vizsgált betonok nyomószilárdsága nagyobb), sem pedig a karbonátosodási mélység tekinteté-

ben (a szabvány csak $x_c = 6$ mm karbonátosodási mélységig érvényes). Megfigyeléseim megkérdőjelezzik a JGJ/T23-2001 szabvány gyakorlati használhatóságát és további kutatások szükségességét jelzik.

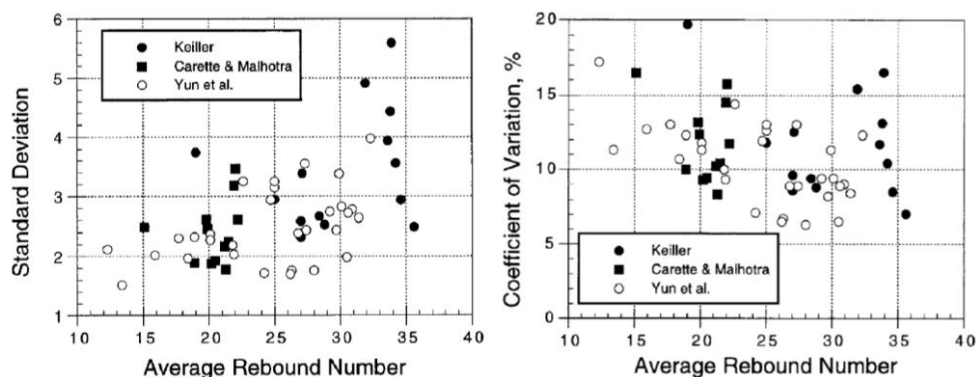
6.2 Visszapattanási értékek statisztikai jellemzői

Ebben a fejezetben az N-típusú és az L-típusú Schmidt-kalapácsokkal megkapott visszapattanási értékek statisztikai jellemzőit foglalom össze. A legfontosabb statisztikai paraméterek értékelését az előző oldalon, a 6.13 ábrán mutattam be. Megfigyeléseim szerint a vizsgált tartományokban az N-típusú és az L-típusú Schmidt-kalapácsokkal megkapott visszapattanási értékek szóródási jellemzői azonos nagyságrendűek és összhangban állnak a legújabb szakirodalmi megfigyelésekkel [41]. Figyelem fölkeltésként a 6.14 ábrán bemutatom az ACI 228.1R-03, az Amerikai Betonszövetség 228 sz. tudományos bizottságának jelentésében publikált ábrát, amely ellentmondásban áll mind a saját megfigyeléseimmel, mind pedig a szakirodalom legfrissebb adataival [41]. Megfigyeléseim megerősítik a szakirodalmi eredményeket [41].



6.13 ábra.

Mért visszapattanási értékek szórása és relatív szórása



6.14 ábra.

Visszapattanási értékek szórása és relatív szórása az ACI 228.1R-03 szerint [44]

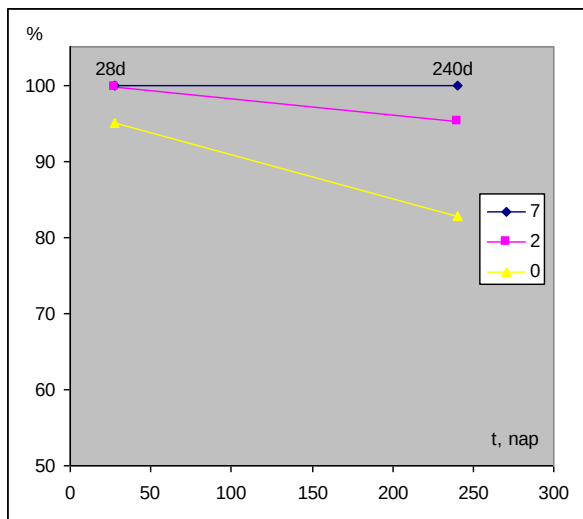
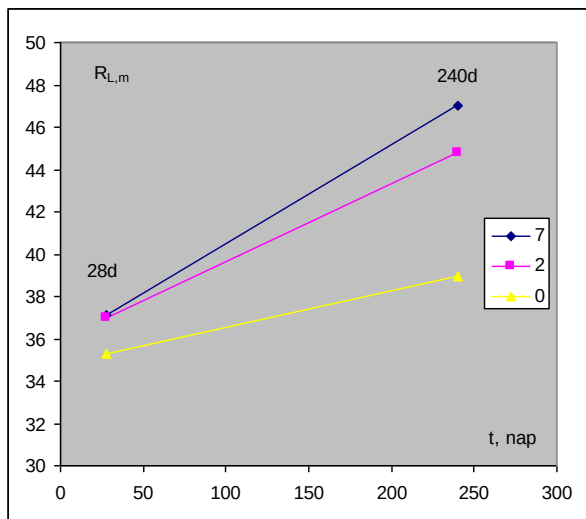
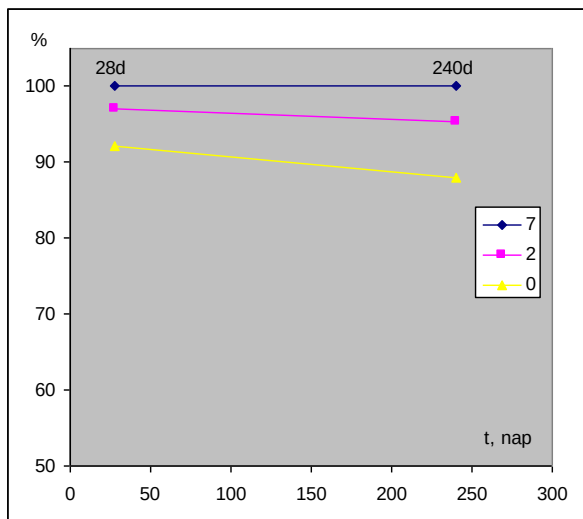
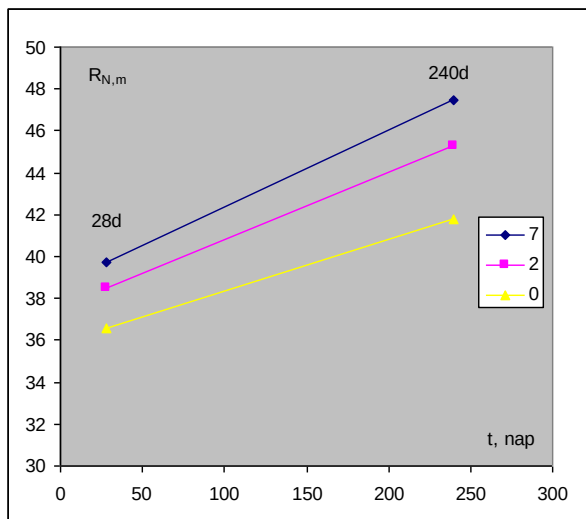
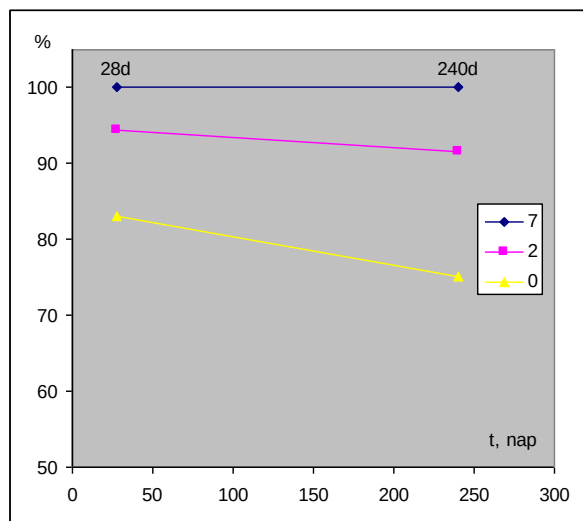
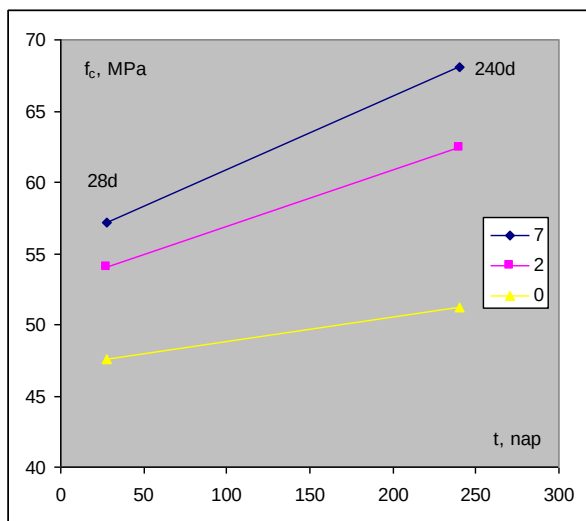
6.3 Tömörítés és utókezelés hatása a visszapattanási értékekre

Laboratóriumi vizsgálataim egyik célja volt annak megfigyelése, hogy a beton tömörítése és a beton utókezelése milyen mértékű változást eredményez a nyomószilárdságban és a felületi keménységben. Előzetes feltételezésem az volt, hogy mindkét hatás markánsan megfigyelhető majd a nyomószilárdságban, míg a felületi keménységre a tömörítésnek csekély vagy semmilyen hatása nem lesz, ugyanis a Schmidt-kalapácsok a betonban a megszilárdult cementkő, a megszilárdult cementhabarcs keménységét mérik, és a tömörítési hiány erre valószínűleg nem gyakorol hatást, illetve a tömörítés hiányából származó felületi üregekre a vizsgáló eszközzel nem is lehet ráütni. Ilyen tömörítési hiány jól kivehető a különböző tömörítési módszerrel készített próbatesteimet bemutató 6.15 ábrán.



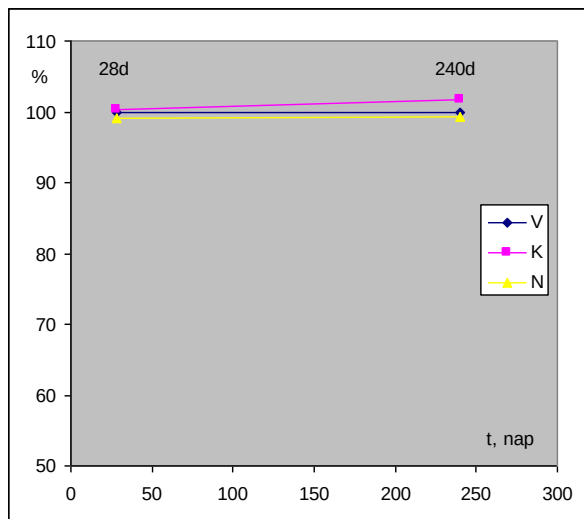
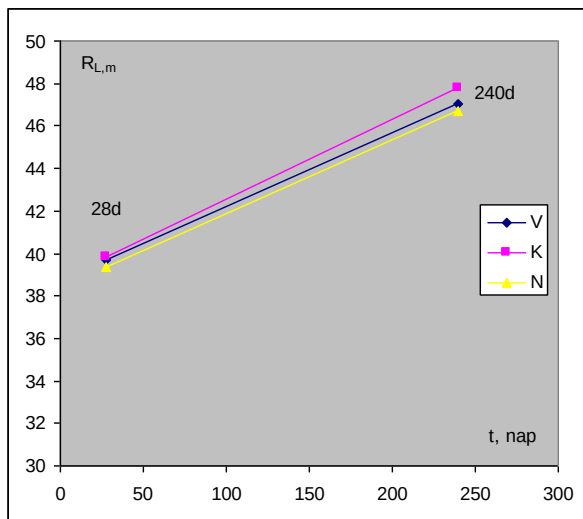
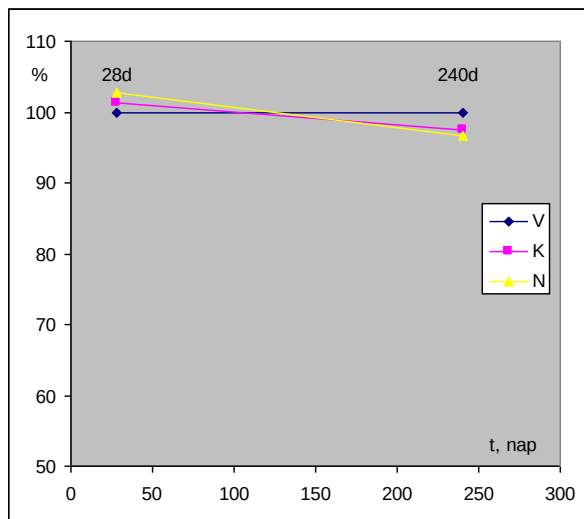
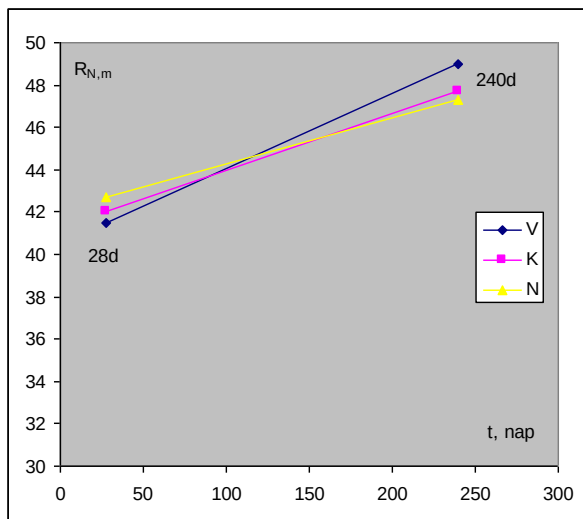
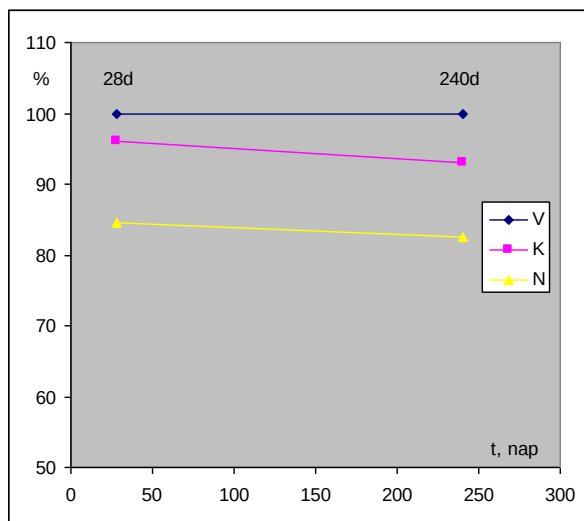
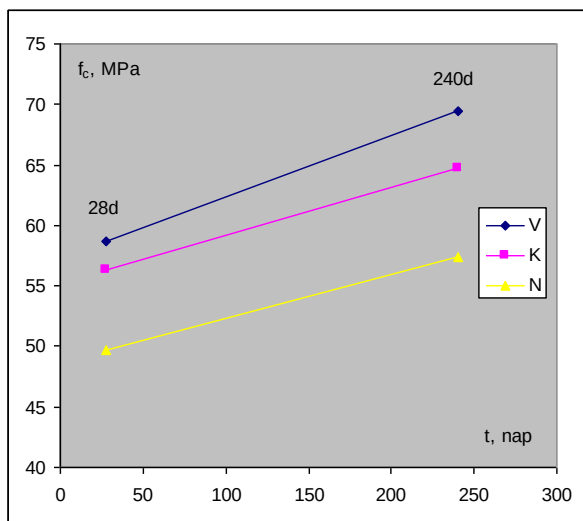
6.15 ábra. N, K, V tömörítésű kockák felületei

A nyomószilárdság vizsgálata során térfogati jellemzőt mérünk, a beton nyomószilárdságot elsősorban az adalékanyag és a cementkő határfelületén kialakuló átmeneti zóna tulajdonságai határozzák meg, ez tekinthető a beton leggyengébb részének. Ismeretes, hogy a beton levegőtartalmának 1 V%-os (10 liter/m³) növekedése a nyomószilárdság 5%-os csökkenéséhez vezet [48]. A beton keverése során levegőt is keverünk bele, amelyet a bedolgozás során nem tudunk teljes mértékben eltávolítani. Amikor a zsálatba bejuttatjuk a betont, a beton levegőtartalma kb. 5-20 V%, a konzisztenciától függően.



6.16 ábra.

Utókezelés hatása a nyomószilárdságra és a visszapattanási értékre



6.17 ábra.

Tömörítés hatása a nyomószilárdságra és a visszapattanási értékre

Egy normál beton esetében (nem fagyálló, légpórusképző adalékszerrel megtervezett) a tömörítés után kb. 0,5-2,5 V% levegőtartalom érhető el, így a betonösszetétel tervezésekor a tervezett levegőtartalmat e határok közé vesszük föl (a betonban nem tud kialakulni 100 %-os tömörség, még a vibrálási idő növelésével sem, sőt nem szakszerű szemeloszlású adalékanyaggal tervezett betonkeverék esetében a túlvibrálás hatására szétosztályozódás is előidézhető).

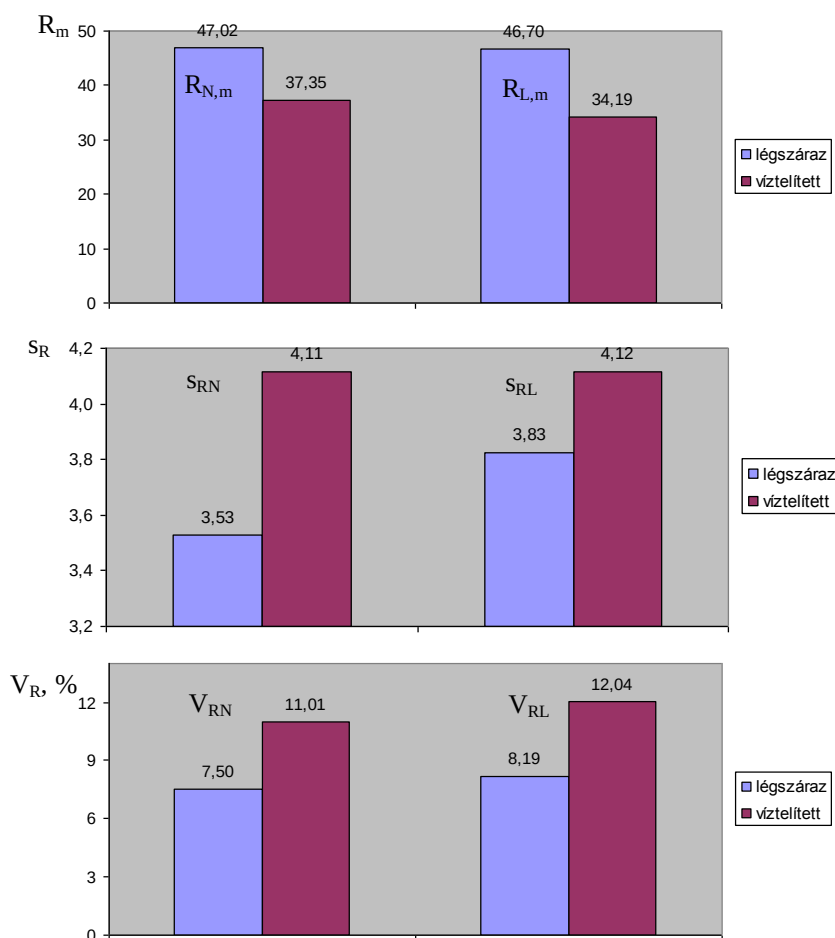
Jelen fejezetben tárgyalt betonösszetétel tervezett levegőtartalma 10 liter volt. Vizsgálataim során olyan tömörítési és utókezelési módszereket választottam, amelyek számottevő eltérést eredményeznek az anyagjellemzőkben. Amint azt korábban is részleteztem, a próbakockákat háromféle tömörítéssel készítettem el (tömörítés vibroasztalon - V; tömörítés kézi erővel - K; nincs tömörítés - N), háromféle utókezelés mellett tároltam (víz alatt tárolás 7 napig; víz alatt tárolás 2 napig; nincs utókezelés) és két eltérő korban (28 napos kor; 240 napos kor) megvizsgáltam a felületi keménységüket és a nyomószilárdságukat. Eredményeimet a 6.16 és 6.17 ábrákon értékelem ki.

A 6.16 ábrán megfigyelhető, hogy az utókezelés időtartamának növelésével a cementkő hidratációja erőteljesebb, ami maga után vonja mind a nyomószilárdság, mind pedig a felületi keménység növekedését. A 6.17 ábrán pedig azt lehet megfigyelni, hogy a tömörítés mértéke erőteljes hatást gyakorol a beton nyomószilárdságára, azonban a felületi keménységben ez nem jelenik meg, lévén az utókezelés mindegyik tömörítési mód esetén 7 napos víz alatt tartást jelentett, azaz a cementkő hidratációja valamennyi esetben azonos, csak a betonok testsűrűsége változik a légzárványok miatt. Megfigyelhető, hogy a vibroasztalos tömörítéssel bedolgozott próbatestek nyomószilárdságához képest az elégtelen tömörítéssel bedolgozott próbatestek nyomószilárdsága a várakozásoknak megfelelően kisebb lett. A kézi erővel tömörített beton nyomószilárdsága 28 napos korban 2,5 N/mm²-rel (4 %-kal), 240 korban pedig 4,8 N/mm²-rel (7 %-kal) csökkent, a vibroasztallal bedolgozott betonéhoz képest. A kőműves kanállal bedolgozott (nem tömörített) beton nyomószilárdsága pedig 28 napos korban 9,0 N/mm²-rel (16 %-kal), 240 napos korban 12,0 N/mm²-rel (18 %-kal) csökkent, a vibroasztallal bedolgozott betonéhoz képest.

A Schmidt-kalapácsos vizsgálat eredményéből egyértelműen megállapítható, hogy a visszapattanási értékek nem tükrözik az elégtelen tömörítés okozta levegőtartalom növekedést. Az eredmények azonosága érthető, hiszen a Schmidt-kalapácsos vizsgálat során a próbatest felületén az ép cementkő alkotta részeket végzünk méréseket, légpórusokra, tömörítési hiányosságokra nem üthetünk az eszközzel. A tömörítés különböző mértékét tehát Schmidt-kalapáccsal nem lehet érzékelni.

Ezt a megállapítást fontosnak tartom, mert a szakirodalom utal arra, hogy a Schmidt-kalapácsokkal *lehetőséges* a betonok szilárdságának egyenletességét ellenőrizni, azonban ezt a kijelentést le kell szűkítenünk arra, hogy a szilárdság egyenletességének változását Schmidt-kalapácsokkal csak abban az esetben tudjuk követni, ha ennek oka vagy a betonösszetétel (elsősorban a víz-cement tényező) megváltozása vagy az utókezelés megváltozása, és a tömörítési hiányból származó szilárdságcsökkenést a Schmidt-

kalapácsok nem jelzik. A gyakorlat szempontjából ez a megállapítás azért fontos, mert a zsaluzott felület közelében (tehát amit vizsgálunk egy szerkezeten) a cementpép feldúsulás eredményezheti azt, hogy csak kevés lunker (légzárvány) alakul ki, és a felületi keménység vizsgálata során a belső tömörítési hiányosságról semmilyen információhoz sem jutunk. Szerencsés esetben a tömörítési hiányt a zsaluzott felületen is érzékeljük szemrevételezés során, de ellenkező esetben erre csak akkor derül fény, ha magmintát fúrunk a szerkezetből és megmérjük a beton testsűrűségét.



6.18 ábra.

Víztartalom hatása a visszapattanási értékre

6.4 Betonfelület nedvességtartalmának hatása a visszapattanási értékekre

Az irodalomkutatáshoz rendelkezésre álló roppant mennyiségű szakirodalmi forrás áttanulmányozása meglepő eredményre vezetett a betonfelület nedvességtartalmának és a visszapattanási értéknek a kapcsolatára vonatkozóan: számos publikációban egyértelműen kijelentik, hogy a betonfelület nedvességtartalmának hatása van a mért visszapattanási értékre, még az is elhangzik, hogy a különbség akár 20% is lehet, de számszerű mérési adat valójában csak egyetlen egy (!) forrásban található. *Samarin* [47] közöl igen szűkszavúan erre vonatkozó eredményeket egy könyvfejezetben. Megfigyeléseit olyan betonokra

vonatkozóan ismerteti, amelyek szabványos (azaz 28 napig víz alatt tárolást követően mért) nyomószilárdsága $f_{cm} = 35,0$ MPa. Többféle tárolású, utókezelésű és felületi víztartalmú próbatest eredményei alapján az állapítható meg, hogy víztelített felület esetén 7%-al kisebb az átlagos visszapattanási érték ($R_m = 27,2$), mint száraz vizsgálati felület esetén ($R_m = 29,3$) [47].

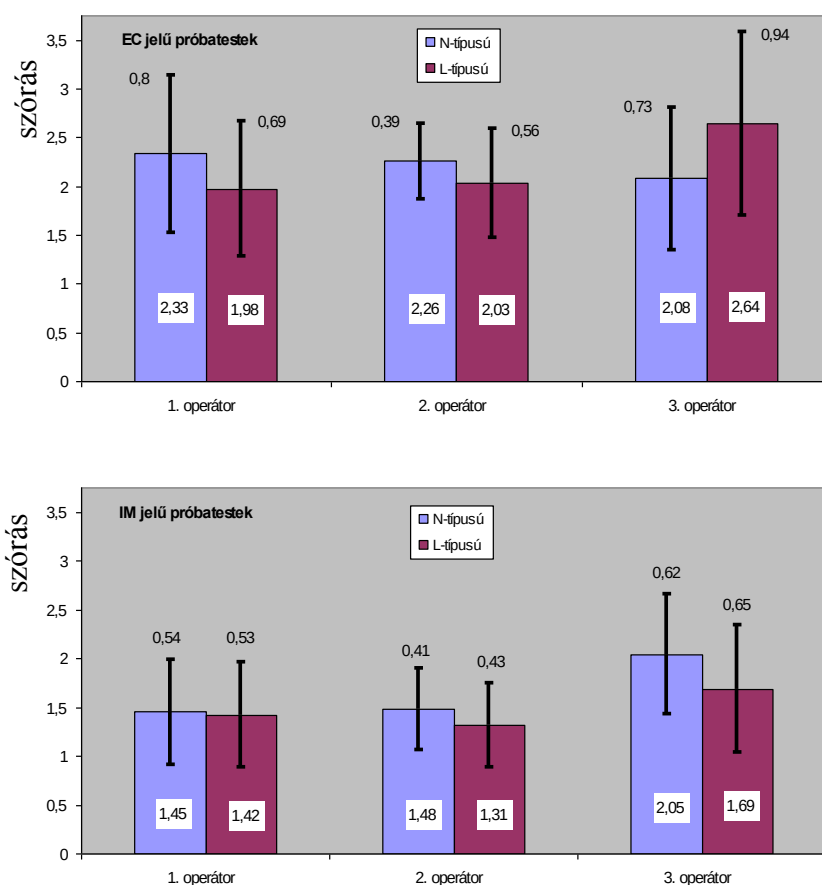
Saját vizsgálataim során ismeretlen összetételű, 2-6 éves korú próbakockákon végeztem vizsgálatokat, amelyeknek légszáraz állapotban mért nyomószilárdsága $f_{cm} = 67,5$ MPa volt. A vizsgálatokat N-típusú és L-típusú Schmidt-kalapácsokkal végeztem. Az átlagos visszapattanási értékre, a visszapattanási érték szórására és relatív szórására vonatkozó kiértékeléseket a 6.18 ábrán mutatom be. Megfigyeléseim szerint a visszapattanási érték csökkenése a víztelített felület miatt a *Samarin* [47] által leírtaknál nagyobbra, 25% körüli értékre adódik, amely megerősíti a szakirodalomban általában leírtakat. Az is látható, hogy a víztelített felületen végzett mérésnek a bizonytalansága is nagyobb, mint a légszáraz felületen folytatott mérésé. A visszapattanási érték szórása 10% körüli értékkel, míg a relatív szórása 45% körüli értékkel nő meg a víztelítés hatására.

Eredményeim rávilágítanak a jelenség fontosságára, és egyúttal a hatás nagyságrendjét is érzékeltetik normál nyomószilárdságú betonok esetén. Bár a vizsgálati protokollok általában nem engedik meg a nedves felületek Schmidt-kalapácsos vizsgálatát, érdekes jövőbeni kutatási téma lehetne a különböző víztartalmi állapotok vizsgálata, esetleg meg lehetne állapítani, hogy mely víztartalomnál van az a határ, amely már számottevő hatást gyakorol a mérés eredményére.

6.5 Összehasonlíthatósági vizsgálatok

A felületi keménységmérés ismételhetőségére vonatkozóan bőséges információt nyertem a vizsgálataimból kiadódó visszapattanási értékek szórására és relatív szórására. Az összehasonlíthatóság fogalmában azonban a vizsgálatot végző operátor által produkált hiba is benne van, ezért erre vonatkozóan külön vizsgálatokat kellett elvégezni, amelyben rajtam kívül még másik két operátor személy is közreműködött. A vizsgálatokat két eltérő szilárdsági osztályú, összesen $2 \times 3 = 6$ db szabványos próbakockán végeztem el. A betonok átlagos nyomószilárdsága $f_{cm,1} = 65,8$ MPa (EC jelű próbatestek) és $f_{cm,2} = 89,7$ MPa (IM jelű próbatestek) volt. Minden egyes próbatesten mindhárom operátor rögzített 20-20 db leolvasást N-típusú és L-típusú Schmidt-kalapáccsal. Az eredményeket beton fajtánként és operátoronként külön értékeltem. A mérés ismételhetőségére vonatkozóan ismét azt a megfigyelést tettem, hogy a nagyobb szilárdságú (nagyobb átlagos visszapattanási értékű) beton esetén a visszapattanási érték szórása és relatív szórása kisebb, függetlenül a vizsgálatot végző operátortól. Az is megfigyelhető volt, hogy a három operátor egyike sem vétett durva hibát a mérések során: az átlagos visszapattanási értékek csaknem azonosra adódtak ugyanazon beton esetén mindhárom operátor mérései során. Az átlagos visszapattanási értékek alapján így nem lehetett következtetéseket levonni az összehasonlíthatóságra. Egy elfo-

gadható közelítésként azt a megoldást választottam az operátorok mérési bizonytalanságainak összehasonlítására, hogy a méréseik szórásait, illetve a szórások egyes statisztikai paramétereit használtam. Úgy tekintetem, hogy egy operátor *pontos*, ha a mérései szórásának átlaga kicsi, és egy operátor *precíz*, ha a mérései szórásának a szórása kicsi. Ez szigorúan véve ugyan nem felel meg a pontosság és precizitás 4.8.2 fejezetben megadott definíciójának, de analógiaként elfogadható, ha úgy tekintjük, hogy a három operátor által megmért átlagos visszapattanási értékek (amelyek csaknem egyenlők) számtani középértéke a valódi érték, amely körüli ingadozást szemléljük. Ha tehát egy operátor méréseinek szórása kicsi, az azt jelenti, hogy a valódi érték szűk környezetében valósít meg leolvasásokat. Ha egy operátor mérései szórásának szórása kicsi, az pedig azt jelenti, hogy az általa megvalósított, a valódi érték körüli leolvasási környezetnek a határa szűk tartományban ingadozik. A vizsgálati eredmények értékelését a 6.19. ábrán mutatom be.



6.19 ábra.

Összehasonlíthatósági vizsgálatok eredményeinek értékelése

Bár a különbségek egyáltalán nem számottevőek, de a fenti elvek alapján végül is ki lehet jelölni pontos és precíz (2. operátor), pontos és nem precíz (1. operátor), valamint nem pontos és nem precíz (3. operátor) személyeket. Az összehasonlíthatósági vizsgálatok során mindig külön értékelni kell, hogy az operá-

torok által megvalósított hibák milyen okokra vezethetők vissza és hogyan lehetséges azok kiküszöbölése a mérésben szerzett több gyakorlattal. A Schmidt-kalapácsos vizsgálat esetén ez két szempontból is fontos, ugyanis a kalibrált állapotú (tehát kedvező ismételhetőségi paraméterekkel rendelkező) készülék használata során is megvalósíthat az operátor *működtetési hibát* (a készülék helytelen tartása és működtetése), illetve *leolvasási hibát* (a skála hibás leolvasása).

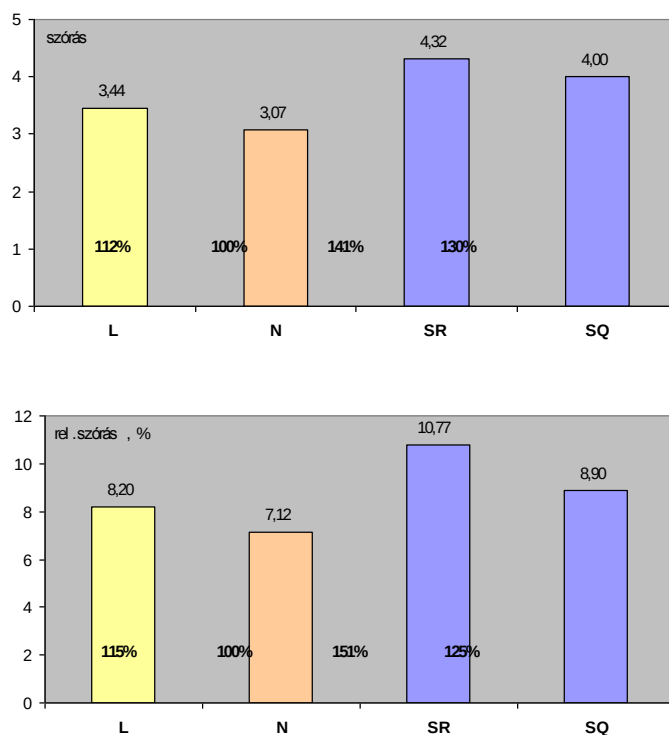
6.6 Különböző kialakítású Schmidt-kalapácsok megbízhatóságának összehasonlítása

Az Ernst Schmidt szerinti eredeti kialakítású, nagyon robusztus és csaknem elnyúlhatatlan, teljes mértékben mechanikus működésű Schmidt-kalapácsokat erős fémház védi, és kalibrálásuk, karbantartásuk egyszerű. Ha a műszert rendszeresen ellenőrizzük és mozgó alkatrészeit tisztán tartjuk, akkor meghibásodásra, bizonytalan működésre szinte csak akkor lehet számítani, ha az operátor kellő gyakorlat hiányában vagy figyelmetlenségből nagyon durva működtetési hibát vét. Napjainkban azonban egy versenytársa jelent meg az eredeti Schmidt-kalapácsoknak, ugyanis a gyártó *Proceq SA* cég 2007 óta forgalmaz egy egészen más adatrögzítési elven működő vizsgálóeszközt is, amelynek a márkaneve Silver Schmidt-kalapács. A berendezés mechanikus alkatrészei kevés módosítástól eltekintve (pl. kisebb tömegű ütőtömeg, mint az eredeti kialakításban) ugyanolyan elven működnek, mint az eredeti eszközökben. A Silver Schmidt-kalapácsok külső burkolata nem fém, hanem műanyag. A Silver Schmidt-kalapácsok nem az ütőtömeg által megtett út függvényében kifejezett R visszapattanási értéket mérik, hanem az ütőtömeg *sebessége* alapján bevezetett Q értéket. Az ütőtömeg sebességét optikai mérőtranszformátor méri. A fényáramot az ütőtömeg felületén lévő barázdák modulálják és továbbítják egy fotodiódára. Az így meghatározott ütési/visszapattanási periódusok időtartama az ütési és visszapattanási sebességek arányát fejezi ki. A sebességmérés eredményét a nehézségi erő gyakorlatilag nem befolyásolja (a klasszikus R visszapattanási érték esetén az ütési irány szerint korrigálni kell). Mivel a Silver Schmidt-kalapácsok ütőtömege kisebb tömegű, így gyorsabban is teszi meg az oda-vissza utat, az eszköz ütőszondája is kisebb tömegű, mint az eredeti Schmidt-kalapácsoké, ezért és a megváltozott mérési módszer miatt a Silver Schmidt-kalapáccsal mért Q érték nagyobb, mint a visszapattanási úthosszat mérő eredeti Schmidt-kalapácsok R visszapattanási értéke. A gyártó állítása szerint a Q és R visszapattanási értékek között nem található kapcsolat. Ez több szempontból is érdekes. Egyrészt a sok évtizedes korábbi tapasztalat az R visszapattanási értékekre vonatkozik, így az új eszközzel gyakorlatilag nem áll rendelkezésre semmi adat a szakirodalomban. A szabványok is az eredeti Schmidt-kalapácsokra vonatkozóan fogalmaznak meg irányelveket. Más részről a megváltozott működési és mérési elv fölveti az ismételhetőségre és összehasonlíthatóságra vonatkozó kérdéseket: vajon biztosítja-e az új eszköz az eredeti Schmidt-kalapácsoktól megszokott mérési bizonytalanságot, vagy annál kedvezőbb esetleg kedvezőtlenebb paraméterekkel rendelkezik? Erre vonatkozóan a szakirodalomban már lehet találni kevés utalást, és az eddigi tapasztala-

tok kedvezőtlenek. Tíz különböző, természetes állapotú kőzetet vizsgált egy oxfordi geológus kutatócsoport különféle keménységvizsgáló eszközökkel 2010-ben, és cikkükben kihangsúlyozták, hogy a Silver Schmidt-kalapáccsal jóval nagyobb számú mérésismétlést kell végezni, ha ugyanolyan konfidencia intervallummal kívánjuk a mérési eredményeket produkálni, mint az eredeti Schmidt-kalapáccsal [46]. Ez egyértelműen jelzi, hogy a Silver Schmidt-kalapács saját mérési bizonytalansága, azaz az ismételhetőségi paraméterei kedvezőtlenebbek, mint elődjéé. Attól eltekintve, hogy ez üzleti szempontból teljes nonszensz (ugyan miért vásárolna egy vevő, aki korábban elégedett volt az eredeti Schmidt-kalapácsának megbízhatóságával és fenntarthatóságával, egy olyan új terméket, amelyre vonatkozóan szakirodalmi referencia nincs, a szabványok nem említik a használatát, műanyag házas megjelenésében sokkal kevésbé tűnik robosztusnak, a mérési bizonytalansága kedvezőtlenebb és a beszerzési ára háromszor annyi, mint az elődjéé), az én figyelmem elsősorban a nagyobb mérési bizonytalanságról a szakirodalomban elhangzottakra irányult. Szerettem volna meggyőződni erről betonokra vonatkozóan is. Egy összehasonlító vizsgálatsorozatot végeztem, amelyben azonos összetételű, 11 darab szabványos próbakockán végeztem felületi keménységmérést, eredeti N-típusú és L-típusú Schmidt-kalapáccsal és egy első generációs N-típusú Silver Schmidt-kalapáccsal (amelyet alkalmassá tettek az R visszapattanási érték rögzítésére is a Q értéken kívül). A napjainkban beszerezhető, második generációs Silver Schmidt-kalapácsok az R visszapattanási értéket már nem mérik, azokkal kizárólag Q értéket lehet mérni. Így lehetőségem volt négy különböző visszapattanási érték összehasonlítására azonos vizsgálati körülmények között. A vizsgált beton nyomószilárdsága $f_{cm} = 67,5$ MPa volt. A vizsgálati eredmények elemzését a 6.20 ábra öszszegzi.

A 6.19 ábrán megfigyelhetjük, hogy kisebb ütési energiával nagyobb bizonytalanság mellett lehetséges a visszapattanási értéket rögzíteni: az eredeti L-típusú Schmidt-kalapács visszapattanási értékeinek a szórása és a relatív szórása is nagyobb, mint az eredeti N-típusú Schmidt-kalapács visszapattanási értékéé. Az ábra arra is rávilágít, hogy mindezek mellett a Silver Schmidt-kalapácsok elektrooptikai adatrögzítése is jelentős bizonytalanságot hordoz magában: a Q érték bizonytalansága 20-30%-al, az R érték bizonytalansága 40-50%-al nagyobb, mint az eredeti N-típusú Schmidt-kalapács R visszapattanási értékéé. A megfigyeléseim részben magyarázatul is szolgálhatnak arra, hogy a gyártó miért szüntette meg a második generációs Silver Schmidt-kalapácsokban az R érték kijelzését – így a két, nagyobb bizonytalansággal mért jellemző közül legalább a rosszabbikat nem látja a használó. Ezzel azonban a korábbi, sok évtizedes használati tapasztalathoz nem lehet kötni a helyszíni méréseket, és a szilárdságbecslést végző személy a gyártó cég (amely nem egy tudományos kutatóintézet, hanem egy eszközgyártó „üzem”) szilárdságbecslő összefüggéseire hagyatkozhat csak, amely kevés tudományos háttér és kevés gyakorlati tapasztalat alapján megalkotott szilárdságbecslő görbéket jelent. A szakma figyelmét erre fel kell hívni, mert a nagyon stabilan, jó ismételhetőségi jellemzőkkel rendelkező, eredeti Schmidt-kalapácsokkal is

meglehetősen nagy kihívás egy ismeretlen összetételű szerkezeti beton szilárdságát megbecsülni (kifűrt magminták nélkül nem is javasolja az MSZ EN 13791:2007 szabvány), sajnos nem engedhetjük meg magunknak azt, hogy a vizsgáló műszer saját bizonytalanságát megnöveljük egy esetleg elhibázott konstrukciós fejlesztéssel.



6.20 ábra.

Különböző kialakítású Schmidt-kalapácsok szóródási jellemzőinek összehasonlítása

7. Összefoglalás

A keménységmérés egy több évszázados múltra visszatekintő szilárdságbecslő, roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer. Ilyen roncsolásmentes vizsgálati eszköz a Schmidt-kalapács. A Schmidt-kalapács által kijelzett visszapattanási értéket nagyszámú különböző hatás befolyásolja, TDK kutatásomhoz ezek közül választottam ki olyanokat, amelyek esetében a szakirodalmi megfigyelések hiányosak vagy el-
lentmondásosak. A dolgozatom előkészítéséhez részletesen áttanulmányoztam a szakirodalmat, majd laboratóriumi kutatási tervet állítottam össze.

Laboratóriumi vizsgálataim során több mint 12500 mérési adatot rögzítettem, amelyeket statisztikai szempontokból is megvizsgáltam és a célkitűzéseimre ezek alapján válaszolok.

Első célkitűzésem, amely a különböző típusú Schmidt-kalapácsok visszapattanási értékeire vonatkozó statisztikai elemzésekre vonatkozik, dolgozatom 6.6 fejezetében vizsgáltam meg. Egyértelműen sikerült megállapítanom, hogy az új típusú Silver Schmidt-kalapáccsal mért Q és R visszapattanási értékek bi-

zonytalansága 20-30%-kal és 40-50%-kal nagyobbak, mint az eredeti N-típusú Schmidt-kalapáccsal mérhető R visszapattanási értékeké. Ez fölveti további kutatások szükségességét. Továbbá fontos megjegyezni, hogy az elmúlt 60 év tapasztalatai mind az eredeti R visszapattanási értékkel kapcsolatosak és a gyártó szerint nincs közvetlen összefüggés a régi R és az új Q visszapattanási értékek között, ezért az eddig használatos összefüggéseket sem lehet felhasználni a szilárdság becslésére.

Második célkitűzésem a Schmidt-kalapácsot működtető operátorok által elkövetett mérési hiba hatásának statisztikai elemzése volt. Ezt dolgozatom 6.5 fejezetében fejtem ki részletesen. A visszapattanási értékeket a mérés közben hibák terhelik, ezek egyik része a vizsgálatot végző operátortól származik. A vizsgálatot rajtam kívül még két operátor segítségével végeztem el. Megfigyelhető volt, hogy az átlagos visszapattanási értékek csaknem azonosakra adódtak minden esetben. Egy elfogadható közelítésként azt a megoldást választottam az operátorok mérési bizonytalanságainak összehasonlítására, hogy a méréseik szórásait, illetve a szórások egyes statisztikai paramétereit használom. Úgy tekintettem, hogy egy operátor *pontos*, ha a mérései szórásának átlaga kicsi, és egy operátor *precíz*, ha a mérései szórásának a szórása kicsi. Így már lehetségessé vált az operátorok értékelése.

További célkitűzésem volt, a valós körülmények hatásának modellezése eltérő karbonátosodási mélységgel rendelkező, idős betonok, illetve eltérő felületi nedvességtartalmú betonok vizsgálatával. Dolgozatom 6.1 fejezetében számos szempontot figyelembe vettem. Megfigyelhető volt, hogy a nedvességtartalom hatására nem csak a visszapattanási érték átlagértéke csökken, de a szóródási jellemzők (szórás és relatív szórás) is nőnek. A karbonátosodás mélységének növekedése szintén a visszapattanási érték szóródási jellemzőinek (szórás és relatív szórás) növekedését eredményezi.

Utolsó célkitűzésem a tömörítés és az utókezelés hatásának vizsgálata volt a visszapattanási értékre. A vizsgálatot dolgozatom 6.3 fejezetében mutattam be. Előzetes feltételezésem az volt, hogy mindkét hatás markánsan megfigyelhető lesz majd a nyomószilárdságban, míg a felületi keménységre a tömörítésnek várhatóan kisebb mértékű hatása lesz. A vizsgálataim során megfigyelhető volt, hogy az utókezelés időtartamának növelésével a cementkő hidratációja erőteljesebb, ami maga után vonja mind a nyomószilárdság, mind pedig a felületi keménység növekedését. Viszont a tömörítés mértéke csak a beton nyomószilárdságára gyakorol jelentős hatást. A beton nyomószilárdsága a tömörítés hiányosságából fakadóan akár 18%-kal is kisebb lehet. A tömörítés különböző mértékét viszont a Schmidt-kalapáccsal nem lehet érzékelni. Ennek a megfigyelésnek nagy gyakorlati jelentőséget tulajdonítok, mert a zsaluzott felület közelében (tehát amit vizsgálunk egy szerkezeten) a cementpép feldúsulás eredményezheti azt, hogy csak kevés légzárvány alakul ki, és a felületi keménység vizsgálata során a belső tömörítési hiányosságról semmilyen információhoz sem jutunk.

8. Jövőbeli kutatás

Mindenképpen szeretném folytatni ebben a témában a kutatásomat. Mélyebben megismerném a Schmidt-kalapácsos vizsgálatokat. Jelen dolgozat keretein belül nem volt lehetőségem a Schmidt-kalapács által kijelzett visszapattanási értéket befolyásoló különböző hatások részletes megvizsgálását, így ha lehetőségeim engedik a dolgozatomban nem szereplő hatásokat is kivizsgálom.

Továbbá a dolgozatom vizsgálata során felmerülő kérdések megválaszolására, érdekességek kifejtésére is további vizsgálatokat kezdeményeznék, amelyek a következők.

A karbonátosodási mélység valószínűségi eloszlásáról tett megállapításaimat további vizsgálatok útján nagyobb mintát figyelembe véve alátámasztanám, igazolnám helyes mivoltát. Ezáltal lehetőségem nyílna a szakirodalom kiegészítésére.

Tovább vizsgálom a karbonátosodási mélység átlagos értéke és a karbonátosodási mélység szóródási jellemzői közötti összefüggéseket.

A dolgozatomban helyet kapó JGJ/T23-2001-es szabvány helyesnek mondható, viszont a szabvány csak $x_c = 6$ mm karbonátosodási mélységig érvényes, az én esetemben rendre nagyobb értékeket olvastam le. A nyomószilárdság tekintetében sem estem a szabvány által javasolt tartományban. Megkérdőjelezhető a szabvány gyakorlati használhatósága, jövőbeli kutatást igényel.

Ha az új N-típusú Silver Schmidt-kalapácsok megbízhatóságát nem ismerik fel időben és elterjed a használatuk vagy a gyártó cég valamilyen módon javítja az értékek szóródási jellemzőit, akkor lehetséges kutatómunka lenne az eredeti visszapattanási értékekhez írt képletek átkonvertálása az új visszapattanási értékekhez. Esetleg új összefüggések megalkotása.

9. Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretném megköszönni konzulenseimnek, Szilágyi Katalinnak és Dr. Borosnyói Adorjának, hogy szakértelmükkel, tudásukkal, idejükkel és türelmükkel folyamatosan segítették munkámat. Köszönöm a folyamatos támogatásukat, segítségük nélkül ez a dolgozat nem készülhetett volna el.

Továbbá köszönöm a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékének, hogy a vizsgálataimhoz szükséges anyagokat, eszközöket és a helyszínt biztosította. Nagymértékben elősegítette, hogy a kísérletsorozataimat laboratóriumi körülmények között végezhessem el.

Köszönet illeti Takács Krisztián technikust, aki a próbatestek készítése és vizsgálata során nyújtott segítséget.

10. Felhasznált irodalom

1. Szilágyi K., Borosnyói A. - 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.
2. Ujhelyi János - Betonismeretek; Műegyetemi Kiadó (Budapest, 2005); 346 p.
3. Holcim Hungária Zrt. - Cement-beton Kisokos; Holcim Hungária Zrt. (2008); 256 p.
4. Holcim Hungária Zrt. - Betonpraxis; Holcim Hungária Zrt. (2011); 141 p.
5. Dr. Palotás László - Minőségi Beton; Közlekedési Kiadó (Budapest, 1952); 344 p.
6. Dr. Csutor János - A beton tömörítése; Műszaki Könyvkiadó (Budapest, 1967); 253 p.
7. Építőanyagok- MSc. - Oktatási segédlet (2011); 152 p. forrás:
http://www.epito.bme.hu/eat/oktatas/feltoltesek/BMEEOEMMST7/eoemmst7_epitoanyagok_msc.pdf;
8. Dr. Balázs György – Építőanyagok és kémia; Műegyetemi Kiadó (Budapest, 1983); 656 p.
9. Réaumur, R. A. F – L’art de convertir le fer forgé en acier; French Academy of Sciences (Paris, 1722)
10. Szymanski, A., Szymanski, J. M.- Hardness Estimation of Minerals, Rocks and Ceramic Materials; Polish Scientific Publishers (Warszawa, Elsevier, Amsterdam, 1989); 330 p.
11. Mohs, F. - Versuch einer Elementar-Methode zur Naturhistorischen Bestimmung und Erkennung von Fossilien (1812); forrás: Österreich Lexikon (<http://aeiou.iicm.tugraz.at>)
12. Gaede, K. - Ein neues Verfahren zur Festigkeitsprüfung des Betons im Bauwerk; Bauingenieur, 1934/15, Vol. 35-3., pp. 356-357
13. Gaede, K. - Die Kugelschlagprüfung von Beton; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; Ernst & Sohn (Berlin, 1952); 73 p.
14. Jones, R. - Non-Destructive Testing of Concrete; Cambridge University Press (1962); 104 p.
15. Malhotra, V. M. - Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods; ACI Monograph, No. 9.; American Concrete Institute (Detroit, 1976); 188 p.
16. Malhotra, V. M., Carino, N. J. - Handbook on Nondestructive Testing of Concrete; Second edition, CRC Press LLC (2004); 384 p.
17. Schmidt, E. - Der Beton-Prüfhammer; Schweizerische Bauzeitung, 15. Juli 1950, 68. Jahrgang, Nr. 28; pp. 378-379
18. Anderson, A. R., Bloem, D. L., Howard, E. L., Klieger, P., Schlitz, H. - Discussion of a Paper by Greene, G. W.: Test Hammer Provides New Method of Evaluating Hardened Concrete; Journal of the American Concrete Institute, December 1955, Vol. 27, No. 4, Part 2; pp. 256-1...256-20

19. Proceq SA - Concrete Test Hammer N/NR,L/LR and DIGI SCHMIDT ND/LD – Rebound Measurement and Carbonation; 2003
20. Bungey, J. H., Millard, J. H., Grantham, M. G. - Testing of Concrete in Structures; Taylor and Francis (New York, 2006); 352 p.
21. MSZ EN 13791 - Assessment of in-situ Compressive Strength in Structures and Precast Concrete Components; European Standard (2007)
22. Roknich György - Háziszabvány-tervezet Schmidt-kalapácsos vizsgálathoz; Útügyi Kutató Intézet (1966)
23. Roknich György - Cement- és betonvizsgálatok, C rész. A roncsolásmentes betonvizsgálat továbbfejlesztése; Útügyi Kutató Intézet, 07066013 sz. jelentés (1967)
24. Roknich György - A beton roncsolásmentes vizsgálata; Mélyépítéstudományi Szemle, XVIII. évf., 7. sz., pp. 298-301 (1968)
25. Borján József - Roncsolásmentes betonvizsgálatok; Műszaki Könyvkiadó (Budapest, 1981); 204 p.
26. Talabér J., Borján J., Józsa Zs. - Betontechnológiai paraméterek hatása a roncsolásmentes szilárdságbecslő összefüggésekre; Tudományos Közlemények 29.; Budapesti Műszaki Egyetem Építőanyagok Tanszéke (1979); 97 p.
27. Reimann J. - Árvizek jellemző adatainak matematikai statisztikai elemzése; Hidrológiai Közlemény 1975/4; pp. 157-163
28. Kolek, J. - Discussion of the paper 3A: Non-destructive Testing of Concrete by Hardness Methods, Proceedings of the Symposium on Non-destructive Testing of Concrete and Timber; 11-12 June 1969, Institution of Civil Engineers, London, 1970; pp. 27-29
29. Schmidt, E. - Versuche mit dem neuen Beton-Prüfhammer zur Qualitätsbestimmung des Betons; Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, V. 17, Mai 1951; pp.139-143
30. Bindseil, P. - On-site Inspection of Concrete Structures: State-of-the-art and Practical Applications; University of Applied Sciences Kaiserslautern, Department of Civil Engineering, (2005) forrás: www.fh-kl.de/~bindseil
31. RILEM - Recommendations for Testing Concrete by Hardness Methods; Tentative Recommendation, 7-NDT Committee – Non Destructive Testing; Matériaux et Constructions, Vol. 10, No. 59. (1977), pp. 313-316
32. Borján J. - Roncsolásmentes betonvizsgálatok értékelése matematikai statisztikai módszerrel; Mélyépítéstudományi Szemle, XVIII. évf., 7. sz. (1968); pp. 294-297

33. Arni, H. T. - Impact and Penetration Tests of Portland Cement Concrete; Highway Research Record 378; Highway Research Board (Washington D.C., 1972), pp. 55-67
34. Leshchinsky, A. M., Yu, M., Goncharova, A. S. - Within-Test Variability of Some Non-Destructive Methods for Concrete Strength Determination; Magazine of Concrete Research, V. 42, No. 153 (1990); pp.245-248
35. Student - Errors of Routine Analysis; Student Biometrika V. 19, No. 1/2 (Jul., 1927); pp. 151-164
36. Jin-Keun Kim, Chin-Yong Kim, Seong-Tae Yi, Yun Lee - Effect of Carbonation on the Rebound Number and Compressive Strength of Concrete; Cement & Concrete Composites, V. 31, (2009); pp. 139-144
37. JGJ/T23-2001 - Technical Specification for Inspection of Concrete Compressive Strength by Rebound Method; (2001)
38. Szilágyi K., Borosnyói A., Zsigovics I. - Introduction of a Constitutive Model for the Rebound Surface Hardness of Concrete; Concrete Structures (2010); pp. 2-8
39. Mohamed Rabehi, Bouzidi Mezghiche, Salim Guettala - Correlation between Initial Absorption of the Cover Concrete, the Compressive Strength and Carbonation Depth; Construction and Building Materials, V. 45, (2013); pp. 123-129
40. Ait-Mokhtar et al. - Experimental Investigation of the Variability of Concrete Durability Properties; Cement and Concrete Research, V. 45, (2013); pp. 21-36
41. Szilágyi K., Borosnyói A., Zsigovics I. - Variability of Concrete Surface Hardness Measurement Parameters; Concrete Structures (2013); pp. 24-30
42. Krauter András - Óravázlatok a Geodézia II. tantárgyhoz; forrás: <http://www.agt.bme.hu/> ; 3
43. fib - Model Code for Service Life Design (2006), fib Bulletin No. 34,
44. ACI 228.1R-03 – In-Place Methods to Estimate Concrete Strength
45. Taylor, John R. – An Introduction to Error Analysis; University Science Books (1997); 94.oldal
46. Viles, H., Goudie, A., Grab, S., Lalley, J. – The Use of the Schmidt Hammer and Equotip for Rock Hardness Assessment in Geomorphology and Heritage Science: a Comparative Analysis; Earth Surface Processes and Landforms (2011) V. 36, pp. 320-333
47. Malhotra, V.M., Carino, N.J. – Handbook on Nondestructive Testing of Concrete; CRC Press LLC (2004); 364 p.
48. Neville, A. M. – Properties of Concrete; Prentice Hall (Essex, 1995); 844 p.
49. Szilágyi Katalin – Beton visszapattanási keménységének és anyagjellemzőinek kapcsolata; Tézisfüzet, PhD értekezés új tudományos eredményei (Budapest, 2013); 21 p.