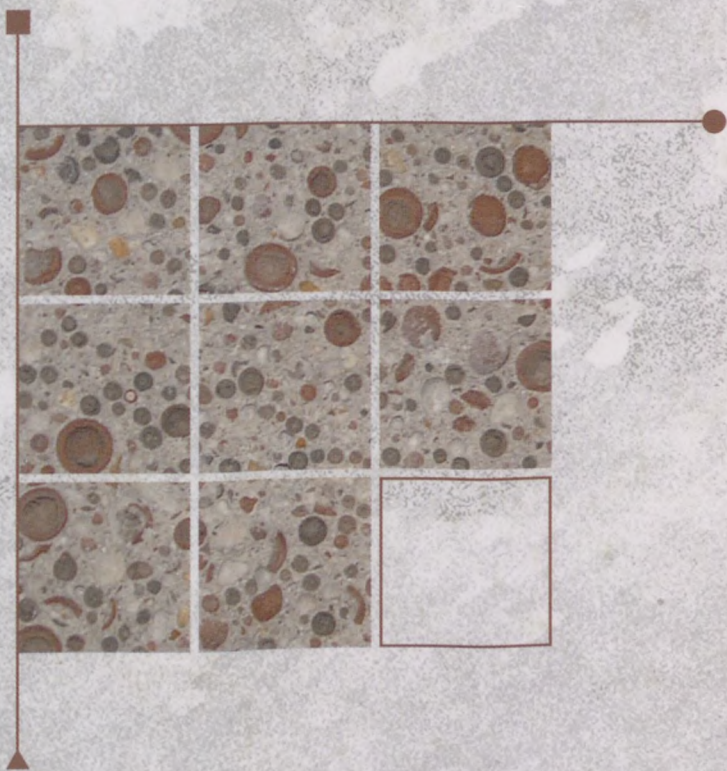


KÜLÖNLEGES BETONOK ÉS BETONTECHNOLÓGIÁK I.



Balázs György

Anyagok, szerkezet, hibamegelőzés

KÜLÖNLEGES BETONOK ÉS BETONTECHNOLÓGIÁK

I.

DR. KAUSZAY LILBOR PHD.

okl. mérnök

okl. vasbeton-építési szakmérnök
a BME Építészeti egyetem tanára
a műszaki tudomány kandidátusa

Eldszó	11
Jelölések	13

DR. BALÁZS GYÖRGY

okl. mérnök

prof. emeritus

a műszaki tudomány doktora

Széchenyi-díjas

1. A különleges beton	17
2. A beton nikotól és vízgőzhatároló réteggel	19
2.1. A beton alkotóiról	19
2.2. A cementek	20
2.2.1. A cementek osztályozása	20
2.2.2. Az előírt követelmények	25
2.2.3. A cementek vizsgálata	26
2.2.4. A cementek alkalmazása	29
2.2.5. A cementek tárolása	31
2.2.6. A cementek szállítása	31
2.2.7. A cementek árak	34
2.2.8. A cementek minősítése	35
2.2.9. A cementek kivételmentesítése	40
2.2.10. A cementek kivételmentesítésének feltételei	42
2.2.11. A cementek kivételmentesítésének eljárása	42
2.2.12. Az előírt követelmények	45
2.2.13. A cementek vizsgálata	47
2.2.14. A cementek alkalmazása	47
2.2.15. A cementek tárolása	50
2.2.16. A cementek szállítása	50
2.2.17. A cementek árak	55
2.2.18. A cementek minősítése	55
2.2.19. A cementek kivételmentesítése	57
2.2.20. A cementek kivételmentesítésének feltételei	62



AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST

Megjelent a Magyar Tudományos Akadémia
és az Építés Fejlődéséért Alapítvány támogatásával

Lektor

DR. KAUSAY TIBOR PHD

okl. mérnök

okl. vasbeton-építési szakmérnök

a BME tiszteleti egyetemi tanára

a műszaki tudomány kandidátusa

ISBN 978 963 05 8465 4

Kiadja az Akadémiai Kiadó,

az 1795-ben alapított

Magyar Könyvkiadók és Könyvterjesztők Egyesülésének tagja

1117 Budapest, Prielle Kornélia u. 19.

www.akademiaikiado.hu

www.szakkonyv.hu

Első magyar nyelvű kiadás: 2007

© Balázs György, 2007

Minden jog fenntartva, beleértve a sokszorosítás, a nyilvános előadás,
a rádió- és televízióadás, valamint a fordítás jogát,
az egyes fejezeteket illetően is.

Printed in Hungary

Tartalom

Előszó	11
Jelölések	13
1. A különleges betonokról és betontechnológiákról általában	17
2. A beton alkotói és vizsgálatuk	19
2.1. A beton alkotóiról általában	19
2.2. A cementek	20
2.2.1. A homogén portlandcementek és jellemzésük	20
2.2.2. A heterogén portlandcementek és jellemzésük	25
2.2.3. A cementszilárdulás sebessége	26
2.2.4. A cement hidratációs alakváltozásai	29
2.2.5. A cementkő porozitása és tulajdonságai	31
2.2.5.1. A porozitás fogalma	31
2.2.5.2. A porozitás és a szilárdság	33
2.2.5.3. A cementkő és a vízzáróság, fagyállóság	34
2.2.5.4. A cementkő zsugorodása, lassú alakváltozása	35
2.2.6. A hidratáció mértéke	40
2.2.7. A cementminősítés alapjául szolgáló tulajdonságok és vizsgálatok	42
2.2.7.1. A kötési idő	42
2.2.7.2. Az őrlési finomság	45
2.2.7.3. A kötőerő	47
2.2.7.4. A térfogatállandóság	47
2.2.8. A hidratációhő	50
2.2.8.1. A hidratációhőről általában	50
2.2.8.2. A vizsgálati módszerek	50
2.2.9. Az új cementszabványok és a cementek új megnevezése	55
2.2.9.1. A cementek jelölése korábbi szabványok szerint	55
2.2.9.2. A cementek jelölése az érvényes szabvány szerint	57
2.2.9.3. 2005 elején gyártott cementfajták	62

2.3.	Az adalékanyag	63
2.3.1.	Az adalékanyagok jellemzése	63
2.3.2.	Az adalékanyagok tulajdonságai	68
2.3.2.1.	A tulajdonságokról általában	68
2.3.2.2.	A tisztasági jellemzők és vizsgálatuk	69
2.3.3.	Szemszerkezeti vizsgálatok	79
2.3.3.1.	A szemmegoszlási görbe	79
2.3.3.2.	A szemmegoszlási görbe minősítése	82
2.3.3.3.	A szemmegoszlás javítása és tervezése több frakcióból	85
2.3.4.	Adalékanyag-halmazok szilárdságának vizsgálata	87
2.3.4.1.	Los Angeles-vizsgálat	87
2.3.4.2.	Mikro-Deval-vizsgálat	88
2.3.4.3.	Hummel szétaprózódási vizsgálat	90
2.3.4.4.	Halmazszilárdság vizsgálata	90
2.3.5.	A szemalak és vizsgálata	91
2.3.5.1.	A szemalak jellemzése a tengelyméretek alapján	93
2.3.5.2.	A homok szemalakjának jellemzése	94
2.3.6.	A víztartalom meghatározása és jellemzése	95
2.3.7.	A cementkő és az adalékanyag közötti tapadás	97
2.3.7.1.	A tapadásról általában	97
2.3.7.2.	A tapadási szilárdság	98
2.3.7.3.	Határfelületi reakciók a betonban	98
2.4.	Adalékszerek	101
2.4.1.	Adalékszerek fogalma	101
2.4.2.	Konzisztenciajavító adalékszerek	102
2.4.2.1.	Képlékenyítő adalékszerek	102
2.4.2.2.	Folyósító adalékszerek	103
2.4.3.	Vizzáróságot fokozó adalékszerek	105
2.4.4.	Fagyállóságot fokozó adalékszerek	105
2.4.5.	Kötés- és szilárdulásgyorsító adalékszerek	107
2.4.6.	Kötéskésleltetők és kötésgátlók	108
2.4.7.	Fagyásgátló adalékszerek	109
2.4.8.	Injektálást segítő adalékszerek	109
2.4.9.	Stabilizáló adalékszerek	109
2.4.10.	Korrózió ellen védő adalékszerek	110
2.4.10.1.	A beton korrózióját gátló adalékszerek	110
2.4.10.2.	Az acébetét korrózióját gátló adalékszerek	110
2.4.10.3.	Biológiai korrózió ellen védő szerek	111
2.4.11.	Az adalékszerek összeférhetősége	111
2.4.12.	Az adalékszerekkel szemben támasztott követelmények	111

2.5.	A beton egyéb anyagai	122
2.5.1.	Színező anyagok	122
2.5.2.	Elektromosan vezető anyagok	122
2.5.3.	Gázképzők, habképzők	122
2.5.4.	Felületi kezelőszerek	123
2.5.5.	Kiegészítő anyagok	123
3.	A beton és vizsgálata	124
3.1.	Az új betonszabvány	124
3.2.	Fogalmak	124
3.2.1.	A frissbeton	124
3.2.2.	A megszilárdult beton	129
3.3.	A frissbeton vizsgálata	140
3.3.1.	A frissbeton konzisztenciájának vizsgálata	140
3.3.1.1.	A roskadásmérés	140
3.3.1.2.	A tömörödési tényező mérése	141
3.3.1.3.	Az átformáláshoz szükséges vibrációs idő meghatározása Vebe-méterrel	142
3.3.1.4.	A területmérés	143
3.3.1.5.	Az átformálási ütészám	145
3.3.1.6.	A tömörítési mérték	146
3.3.1.7.	A régi és az új konzisztenciaosztályok összehasonlítása	147
3.3.2.	A betonalkotók mennyiségének meghatározása	148
3.3.2.1.	A víztartalom meghatározása	148
3.3.2.2.	A testsűrűség meghatározása	148
3.3.2.3.	A cementtartalom meghatározása	149
3.3.2.4.	A víz-cement tényező számítása	150
3.3.2.5.	Az adalékanyag-tartalom kiszámítása	150
3.3.2.6.	A légbuborék-tartalom meghatározása	150
3.3.3.	A keverési arány számítása	151
3.3.3.1.	A keverési arány számítása az alapanyagok fizikai jellemzői ismeretében	151
3.3.3.2.	A keverési arány meghatározása a frissbeton testsűrűségének előzetes becslésével	152
3.3.4.	A péptelítettség közelítő számítása	153
3.4.	A megszilárdult beton tulajdonságai és azok vizsgálata	154
3.4.1.	A testsűrűség meghatározása	154
3.4.2.	A nyomószilárdság vizsgálata	155
3.4.3.	A húzószilárdság és vizsgálata	161
3.4.4.	A hidrotechnikai tulajdonságok és vizsgálatuk	164
3.4.4.1.	A víztartalom	164

3.4.4.2.	A vízfelvétel	165
3.4.4.3.	A vízzáróság és vizsgálata	166
3.4.4.4.	A vízáteresztés és vizsgálata	168
3.4.4.5.	A fagyállóság és vizsgálata	169
3.4.5.	A kopásállóság és vizsgálata	174
3.4.5.1.	Böhme-koptatás	174
3.4.5.2.	A Gary-homokfúvási koptatás	175
3.4.5.3.	A Duna-módszer	175
3.4.6.	A beton hőtechnikai jellemzői és mérések	179
3.4.6.1.	A hőmérséklet és mérése	179
3.4.6.2.	A lineáris hőtágulási együttható	182
3.4.6.3.	A hő terjedését kifejező anyagjellemzők	182
3.4.6.4.	A fajhő	185
3.4.7.	Ajánlás a betonösszetétel határértékeire	185
4.	A beton szilárdulása hidegben	191
4.1.	Az egyenértékű kor	191
4.2.	Az egyenértékű kor heterogén portlandcementekre	192
4.2.1.	A kísérlet	192
4.2.2.	A kísérleti eredmények és értékelésük	194
4.3.	A hőmérséklet alakulása a bedolgozott betonban	216
4.4.	Egyszeri megfagyás hatása a beton természetes szilárdulására	229
4.4.1.	A kritikus szilárdság	229
4.4.2.	Kutatásaink	229
5.	Tömegbetonok hidratációhő okozta repedései és megelőzésük	233
5.1.	A tömegbeton fogalma	233
5.2.	A kéreg- és átmenő repedések fogalma	234
5.3.	A hidratációhőt befolyásoló tényezők	237
5.3.1.	A hidratációhő meghatározása hőáramlásos kaloriméterben	237
5.3.2.	A cement hidratációhőjét befolyásoló tényezők	243
5.3.2.1.	A cement kémiai és ásványi összetételének hatása	243
5.3.2.2.	Az őrlési finomság hatása a hidratációhőre	248
5.3.2.3.	A kezdeti hőmérséklet hatása a hidratációhőre	250
5.3.2.4.	A kötőszabályozó adalékszerek hatása a hidratációhőre	251
5.3.2.5.	A víz–cement tényező hatása a hidratációhőre	252
5.3.2.6.	A cementek hidratációhője és a cementhabarcs szilárdsága közötti összefüggés	253
5.4.	A tömegbetonok hőtechnikai vizsgálata	253
5.4.1.	A tömegbetonok hőtechnikai jellemzői	253

5.4.2.	A betonban keletkező hőmérséklet közelítő számítása	254
5.4.2.1.	A legnagyobb hőmérséklet meghatározására szolgáló közelítő képletek	256
5.4.2.2.	Kéregrepedések veszélyének közelítő számítása	258
5.4.2.3.	Kényszerfeszültségek és átmenő repedések közelítő számítása	260
5.4.3.	A repedésveszély becslése gépi számítással	261
5.4.3.1.	Bevezetés	261
5.4.3.2.	A hőmérséklet-számítás elve	262
5.4.3.3.	A kéregrepedések keletkezése valószínűségének vizsgálata	266
5.4.3.4.	Az egyes tényezők hatása a kéregrepedés veszélyére	273
5.4.3.5.	A kéregrepedésekről a tapasztalat alapján	284
5.4.3.6.	Az átmenő repedések veszélyének számítása	286
5.5.	A tömög betonban kialakuló repedésveszély csökkentésének lehetőségei	288
5.5.1.	A csökkentés lehetőségei általában	288
5.5.2.	A hidratációhő csökkentése	288
5.5.3.	A beton alkotóinak hűtése	289
5.5.4.	A beton belső csőhűtése	292
5.5.5.	A csővezetékes hűtőrendszer számítása	293
5.5.6.	A hőmérséklet okozta feszültségek csökkentése a betonfelület védelmével	294
5.5.7.	Az építéstechnológia megfelelő megválasztása	296
6.	Nagy szilárdságú cementek (550 pc) felhasználásában rejülő lehetőségek	301
6.1.	Bevezetés	301
6.2.	A cementgyártás energiafelhasználása	302
6.3.	Az előregyártás helyzete hazánkban a 80-as évek végén	305
6.4.	Az 1968. évi laboratóriumi kísérletek	306
6.5.	Kísérletek külföldi cementekkel	309
6.6.	Kísérletek 550 pc-tel 1984–85-ben	311
6.6.1.	Laboratóriumi kísérletek	311
6.6.2.	A hidratációhő energiataralma	313
6.6.3.	Az 550 pc öregedése	315
6.6.4.	Félüzemi kísérletek az egykori BVM (Beton és Vasbetonipari Művek) Alsószolcai Gyárában	316
6.6.5.	Félüzemi kísérletek a volt Szolnok megyei ÁÉV előregyártó telepén	319
6.6.6.	A nagy cementtartalom hatása a szilárdságra	321
6.7.	Az 1987. évi laboratóriumi kísérletek	323

7. A beton gőzölése	329
7.1. A gőzölés fogalma	329
7.2. A gőzölési diagram	329
7.3. A struktúraromlás kémiai okai	331
7.4. A struktúraromlás fizikai okai	333
7.4.1. A beton alkotóinak eltérő hőtágulási együtthatója	333
7.4.2. Vizforgalom a beton és a gőztér között	336
7.4.3. Hőmérsékleti feszültségek és repedések	340
7.4.3.1. A hőmérsékleti feszültségek számítása számítógéppel ..	341
7.4.3.2. A hőmérsékleti feszültségek közelítő számítása	345
7.4.4. Hogyan védekezzünk a fizikai struktúraromlás ellen?	350
7.5. A cementek gőzölhetősége	353
7.5.1. Egyenletek a gőzölhetőség előrebecslésére	353
7.5.2. A cementfajta hatása a gőzölés határfokára	355
7.5.3. Optimális gőzölési hőmérséklet	360
7.5.4. Az őrlési finomság hatása a gőzölhetőségre	362
7.5.5. A gőzölés szabályai	368
7.6. A beton szilárdulása gőzölés után	372
7.6.1. Milyen mértékű utókezelést igényel a gőzölt beton?	372
7.6.2. A fagy hatása gőzölt betonok szilárdulására	384
Irodalom	387

Előszó

1950-ben szereztem mérnöki oklevelet. Attól kezdve mindig ugyanazon a tanszéken dolgoztam, bár neve változott. 1950 és 1963 között II. sz. Hidépítéstani Tanszék, 1963 és 1999 között Építőanyagok Tanszék, 1999 óta Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék a neve.

A sokféle építőanyag közül elsősorban betonnal foglalkoztunk. Kutatásainkat szerényen támogatta a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Tudományok Osztálya, és igen jó kapcsolat alakult ki a Tanszék oktatói és az építőipari vállalatok között. Megengedték, hogy konkrét gyakorlati feladatok megoldását tudományosan megalapozzuk.

A II. sz. Hidépítéstani Tanszéken elkészített kutatási jelentéseinket *Balázs György*: *Beton és vasbeton V. A kutatás története* (2004) c. könyv 22.7. mellékletében, az *Építőanyagok*, majd *Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéken készítettetek* a 22.8. mellékletében foglaltam össze. A 45 oldalnyi felsorolásból jól látható, hogy a kutatók többsége a különleges betonokkal és betontechnológiákkal foglalkozott. 200-nál több kötetnyi kutatási jelentés tartalmazza csak azokat a kutatásokat, amelyeket irányítottam vagy amelyekben közreműködtem.

Ujhelyi János: *Műszaki előírás. Beton és vasbeton készítésére* c. kitűnő könyvsorozatban (1955) 22. füzetben, logikai rendben felépített tanácsokat ad a beton tervezésével, építésével és ellenőrzésével foglalkozóknak a közönséges és a különleges betonok területéről. *Dr. Ujhelyi János*: *Betonismeretek* (2005) c. tankönyvében ehhez az elvi alapokat is megadta.

Azonban egyre inkább úgy éreztem, hogy közkinccsé kell tennem kutatási eredményeinket (szükség szerint másokéval kiegészítve), amelyek – különösen a különleges betontechnológiák területén – sok újat tartalmaznak. Ebben az is megerősített, hogy évről évre nő azok száma, akik a *Betontechnológia* c. 2 éves szakmérnöki tanfolyamot elvégzik és – megítélésem szerint – kellő mélységben akarnak és tudnak foglalkozni a betontechnológiával. Egyébként nekik a különleges betonok és betontechnológiák c. könyvsorozat tankönyv is lesz.

Persze meg kellett küzdenem olyan nehézséggel, hogy az elmúlt évtizedekben változtak a cementek, változtak a szabványok, változtak a jelölések. Gondoljunk csak arra, hogy forradalmi változást hozott az MSZ 4798:2004 szabvány, amely a tartóságra tervezés alapján áll és áttérve az EN szabványokra magával hozott új jelöléseket. De sem a szabványok, sem a jelölések nem forrtak ki, állandóan változhatnak.

Én azonban – a 80. évemmel – már nem várhatom meg, hogy mindez nyugvópontra kerüljön.

A könyv megírásához a Tanszéken készített tanulmányokat, szacikkeket, korábban megjelent könyveimet használtam fel. Köszönetet mondok mindazoknak, akik ezekben a kutatásokban közreműködtek, külön köszönettel tartozom a tanszéki technikusoknak a fegyelmezett, pontos kutatási munkáért.

Az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék vezetőjének, dr. Balázs L. Györgynek és a Tanszék dolgozóinak a könyv írásához nélkülözhetetlen nyugodt légkört, Sántha Gyuláné titkárnőnek az adminisztratív segítséget köszönöm meg.

A könyv kéziratát Polányi Aladárné gépelte tükörbe, a pausz ábrákat Bubb Zsuzsanna rajzolta, a cirill betűk latin betűkre ültetését Czenczi Ferencné általános iskolai tanár segítette. Segítségüket köszönöm!

A kéziratot dr. Kausay Tibor PhD, a műszaki tudomány kandidátusa, tiszteleti egyetemi tanár lektorálta. Lelkiismeretes munkájával, tanácsaival mint kiváló beton-tudósunk, az EN szabványok egyik legjobb ismerője, sokat segített. Megengedte azt is, hogy néhány ábráját felhasználjam a könyvhöz. Segítségét köszönöm.

A kötet szép kiállítása az Akadémiai Kiadó érdeme. Megköszönöm Nagy Tibor szerkesztőnek, Tárnok Irén felelős szerkesztőnek és Hesz Margit termékmenedzsernek, a Kiadó és a Nyomda munkatársainak fegyelmezett segítőkész közreműködését.

A szerző

Ujfalvi János: Műszaki előírás. Beton és vasbeton készítésére a kitűnő könyvsorozatban (1952) 22. füzetben, logikai rendben felépített tanácsokat ad a beton tervezésével, építésével és ellenőrzésével foglalkozóknak a közönséges és a különleges betonok területéről. Dr. Ujfalvi János: Betonműanyagok (2005) c. tankönyvében elhagyta az évi alapokat is megadva.

Azokban egyre inkább úgy érzem, hogy kíváncsi vagyok, hogy a kutatási eredményeinket (szelvényeket másokkal összehasonlítva), amelyek – különösen a különleges betontechnológiák területén – sok újat tartalmaznak. Ebben az is megértenem, hogy évről évre nő azok száma, akik a Betontechnológiák c. 2 éves szakmunkai tanfolyamot elvégzik és – megelégedtem ezírt – kellemes meglepetésben akadnak és tudnak foglalkozni a betontechnológiával. Egyedül nekik a különleges betonok és betonműanyagok c. könyvsorozat tankönyv is lesz.

Pérsze meg kellene látnom olyan nehézséggel, hogy az elmúlt évtizedekben változtak a cementek, változtak a szabványok, változtak a jelölések. Gondoljunk csak arra, hogy formáim változtak hiszen az MSZ 4788:2004 szabvány amúgy a tanfolyam tervezés alapján áll és újratervezés alapján áll és újratervezés alapján áll jelöléseket. De sem a szabványok, sem a jelölések nem forrtak át, állandóan változtak.

Jelölések

Az itt nem található jelöléseket előfordulási helyükön adjuk meg.

A cement kémiai és ásványi alkotói, cementhidratáció

Jel	Mennyiség	Mértékegység
C = CaO	kalcium-oxid	m%
S = SiO ₂	szilícium-dioxid	m%
A = Al ₂ O ₃	alumínium-oxid	m%
F = Fe ₂ O ₃	vas-oxid	m%
M = MgO	magnézium-oxid	m%
Cs = CaSO ₄ · 2H ₂ O	gipszkő (amit általában gipsznek neveznek)	m%
H = H ₂ O	víz	m%
C ₃ S = 3CaO · SiO ₂	trikalcium-szilikát	m%
βC ₂ S = 2CaO · SiO ₂	béta-dikalcium-szilikát	m%
C ₃ A = 3CaO · Al ₂ O ₃	trikalcium-aluminát	m%
C ₄ AF = 4CaO · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	tetrakalcium-aluminát-ferrit	m%
CH = Ca(OH) ₂	kalcium-hidroxid	m%
MH = Mg(OH) ₂	magnézium-hidroxid	m%
CSH	kalcium-szilikát-hidrát	m%
E = C ₃ A · 3Cs · H ₃₂ , ill. C ₃ AF · 3Cs · H ₃₂	trisulfo-aluminát-hidrát = ettringit	m%
MS, ill. FMS = C ₃ A · Cs · H ₁₂ , ill. C ₃ AF · Cs · H ₁₂	monosulfo-aluminát (ferrit)-hidrát = monoszulfát	m%
T = C ₃ A · 3CaCl ₂ · H ₃₀	trikloro-aluminát-hidrát	m%
F = C ₃ A · CaCl ₂ · H ₁₀	monokloro-aluminát-hidrát = Friedel-só	m%
P _H	hidratáció mértéke a portlandit víztartalma alapján	%
CSH _H	hidratáció mértéke a CSH szerkezeti víztartalma alapján	%
E	Jirku szerinti optimális gipsztartalom, amelyet egyensúlyinak nevezünk és SO ₃ (m%) = 6,08 · 10 ⁻⁵ · C ₃ A (m%) · (cm ² /g) képletből számítottunk.	m%

Feszültség, szilárdság

F	terhelőerő	kN, MN
σ	terhelőfeszültség	MPa
c	kohézió	
φ	súrlódási szög	fok
σ_{crit}	kritikus feszültség	MPa
σ_{ct}	központos húzófeszültség	MPa
$f_{c, cube}$	a beton nyomószilárdsága 150 mm élhosszú kockán vizsgálva	MPa
$f_{ci, cube}$	a nyomószilárdság egyedi értéke 150 mm élhosszú kockán vizsgálva MPa	
$f_{cm, cube}$	a nyomószilárdság átlagértéke 150 mm élhosszú kockán vizsgálva	MPa
$f_{cm, cube, test}$	a nyomószilárdság tapasztalati átlagértéke 150 mm élhosszú kockán vizsgálva	MPa
$f_{ck, cube}$	a nyomószilárdság előírt jellemző értéke 150 mm élhosszú kockán vizsgálva	MPa
$f_{ck, cube, test}$	a nyomószilárdság tapasztalati jellemző értéke 150 mm élhosszú kockán vizsgálva	MPa
$f_{c, cyl}$	a beton nyomószilárdsága $\varnothing 150/300$ mm hengeren vizsgálva	MPa
$f_{ci, cyl}$	a beton nyomószilárdság egyedi értéke $\varnothing 150/300$ mm-es hengeren vizsgálva	MPa
$f_{cm, cyl}$	a nyomószilárdság előírt átlagértéke $\varnothing 150/300$ mm-es hengeren vizsgálva	MPa
$f_{cm, cyl, test}$	a nyomószilárdság tapasztalati átlagértéke $\varnothing 150/300$ mm-es hengeren vizsgálva	MPa
$f_{ck, cyl}$	a nyomószilárdság előírt jellemző értéke $\varnothing 150/300$ mm-es hengeren vizsgálva	MPa
$f_{ck, cyl, test}$	a nyomószilárdság tapasztalati jellemző értéke $\varnothing 150/300$ mm-es hengeren vizsgálva	MPa
f_{ti}	a beton hasító–húzó szilárdságának az egyedi értéke (ha egy mintából 3 próbatest készült, annak átlaga egy vizsgálati eredménynek számít)	MPa
f_{tk}	a beton jellemző hasító–húzó szilárdságának előírt jellemző értéke $\varnothing 150/150$ mm méretű hengeren vizsgálva	MPa
$f_{tm, test}$	a beton hasító–húzó szilárdságának tapasztalati átlagértéke $\varnothing 150/150$ mm-es hengeren vizsgálva	MPa
$f_{ci, fl}$	a beton egyedi hajlító–húzó szilárdsága	MPa
$f_{c, pr}$	a beton hasábszilárdsága	MPa
f_{ct}	központos húzószilárdság	MPa
$f_{ct, fl}$	hajlító–húzószilárdság	MPa
$f_{ct, sp}$	hasító–húzószilárdság	MPa
$f_{\tau, tap}$	nyíró–tapadási szilárdság	
$f_{\tau, t}$	húzó–tapadási szilárdság	MPa

Alakváltozás

ε	fajlagos hosszváltozás	‰
ε_x	fajlagos hosszváltozás a terhelőerő irányában	‰
ε_y	fajlagos hosszváltozás a terhelőerő irányára merőlegesen	‰
$\mu = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$	Poisson-tényező	1
ε_t	szakadó nyúlás	‰
ε_c	törési összenyomódás	‰
$\varepsilon_{c,sh}$	a cementkő, a beton zsugorodása	‰
ε_{el}	a beton rugalmas alakváltozása	‰
$\varepsilon_{c,1}(t)$	a beton lassú alakváltozása t időpontban	‰
$\varphi(t) = \frac{\varepsilon_{c,1}(t)}{\varepsilon_{el}}$	a beton kúszási tényezője t időpontban	‰
E_0	kezdeti rugalmassági modulus	
$E_{0,t}$	kezdeti rugalmassági modulus központos húzásból	GPa
$E_{0,c}$	kezdeti rugalmassági modulus központos nyomásból	GPa
E_σ	terhelő feszültségtől függő rugalmassági modulus	GPa
E_a ill. E_h	az adalékanyag, ill. a habarcs rugalmassági modulusa	GPa
$E_{id} = \frac{E_0}{1+\varphi}$	a lassú alakváltozást figyelembe vevő, ún. ideális rugalmassági modulus	GPa

Geometriai és tömegjellemzők

l	támaszköz	m, cm, mm
d	henger átmérője, szita, ill. rosta lyukbősége	mm
h	henger hossza	mm
m	tömeg	kg/m ³
m_w, m_c, m_h	a víz, a cement, ill. a homok tömege	kg/m ³
$m\%$	az anyag tömegére vonatkoztatott eredmény	
$x = \frac{m_w}{m_c}$	víz-cement tényező	
x_o	redukált víz-cement tényező	
ρ	sűrűség	kg/m ³
ρ_t	testsűrűség	kg/m ³
V	térfogat	l, m ³
$V\%$	az anyag térfogatára vonatkoztatott eredmény	
V_c, V_w, V_h , ill. V_l	a cement, a víz, a homok, ill. a levegő térfogata	l, m ³
V_p	pépmennyiség	l, m ³
$V_{p,0}$	péptelítettséghez tartozó pépmennyiség	l, m ³
A	Blaine szerinti fajlagos felület (alsó indexben a kötőanyag, pl. A_c = cement fajlagos felülete)	cm ² /g
d_{max}	legnagyobb névleges adalékszemcse-méret	mm
m_A	Az <i>Abrams</i> szerinti finomsági modulus, a szabványos szitasoron fennmaradt tömegszázalékban kifejezett összege osztva 100-zal	
m_0	optimális finomsági modulus, ill. a finomsági modulus, amelyhez a pépigény minimális	
$p = \left(1 - \frac{\rho_t}{\rho}\right)$	100 porozitás	V%
p_{krit}	extrapolált porozitás zérus szilárdság esetére	V%

1. A különleges betonokról és betontechnológiákról általában

A közönséges betonok csoportjába azokat a betonokat soroljuk, amelyeket szokványos technológiával (keverés, szállítás, bedolgozás) állítanak elő, és velük szemben előírt követelmény a betonkonzisztencia, valamint a testsűrűség és a nyomószilárdság, követelmény továbbá vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek esetében az acélbetétek korrózió elleni védelme, amit rendszerint tömör beton készítésével és megfelelő betonfedéssel érünk el.

Az ettől eltérő betonok lehetnek különleges rendeltetésű és különleges technológiával készített betonok.

A különleges rendeltetésű betonok:

- vízzáró beton,
- kopásálló beton,
- nagy nyomószilárdságú beton,
- nagy húzószilárdságú beton,
- könnyűbeton,
- szálerősítésű beton,
- fagy- és sózásálló beton,
- agresszív hatásnak ellenálló beton,
- kis zsugorodású és kis kúszású beton,
- sugárvédő beton,
- hőálló és tűzálló beton,
- átlátszó beton.

Különleges technológiával készített betonok:

- a beton szilárdulása hidegben,
- nagy szilárdságú cementek felhasználásában rejlő lehetőségek,
- gőzölt beton,
- nagy tömegű beton,
- látszóbeton,
- dermesztett beton,
- lövellt beton,
- kolkrétbeton,
- prepakt beton,
- pörgetett beton,

- vákuum-, vibrovákuum beton,
- víz alatti beton,
- szövetszerkezetes építés,
- No-fines beton.

Továbbiakban ismertnek tételezzük fel a szokványos betonok tervezését és tulajdonságait. Röviden ismertetjük a különleges rendeltetésű betonok tárgyalásához nélkülözhetetlen anyagismeretet, valamint betontulajdonságokat és azok vizsgálati módját.

	az anyag tömegsűrűsége	
	A közönséges betonok csoportjába azokat a betonokat soroljuk, amelyek szokványos technológiával (keverés; szállítás; bedolgozás) állítanak elő, és velük szemben előtti követelmény a betonkonzisztencia, valamint a szűrésű és a nyomószilárdság követelmény továbbá vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek esetében az acélszerkezet elleni védelem, ami rendszerint tömör beton készítésével és megfelelő betonfedéssel érnek el.	
V_c, V_w, V_a, E	Az enélkülálló betonok ismétnek különleges rendeltetésű és különleges technológiával készített betonok.	
V_c	A különleges rendeltetésű betonok:	
V_w	- vízszelő beton	
V_a	- köpésálló beton	
E	- nagy nyomószilárdságú beton	
A	- nagy húzószilárdságú beton	
d_{max}	- könnyűbeton	
m_1	- szigetelőbeton	
m_2	- fagy- és sószálló beton	
m_3	- agresszív hatással szembeálló beton	
m_4	- kis zsugorodású és kis kúszású beton	
m_5	- sugárvédő beton	
m_6	- hőálló és tűzálló beton	
m_7	- átlátszó beton	
m_8	Különleges technológiával készített betonok:	
m_9	- a beton szilárdulásáig hidegben	
m_{10}	- nagy szilárdságú cementek felhasználásában ritkított betonok	
m_{11}	- gördülő beton	
m_{12}	- nagy tömegű beton	
m_{13}	- látszóbeton	
m_{14}	- beüzemelt beton	
m_{15}	- fövellő beton	
m_{16}	- kolkőbeton	
m_{17}	- prepárolt beton	
m_{18}	- pórtított beton	

2. A beton alkotói és vizsgálatuk

2.1. A beton alkotóiról általában

[Balázs (2001)]

A **beton többfázisú anyag**, amely szilárd alkotókból (homok, durva adalékanyag, hidratált és hidratálatlan cement), pórusokból (gélpórus, kapillaris pórus, légpórus) és azokat részben vagy egészben kitöltő vízből (vagy polimerből) áll. Ennek ellenére olyan **kétfázisú anyagnak tekinthető**, amelyben a méretben és térfogatarányban egyenlőtlen eloszlású durva adalékanyag a sokkal homogénebb cementhabarcsba (cement, víz, homok) van beágyazva. Ezt figyelembe véve a kutatók kétféle típusú struktúrát különböztetnek meg: a mikrostruktúrát, vagyis a cementkő szerkezetét és a makrostruktúrát, vagyis a habarcs és beton szerkezetét.

A másik irányzat [pl. *Grusko–Iljin–Rasevszkij* (1973)] háromféle struktúrát különböztet meg: makrostruktúrát, mezostruktúrát és mikrostruktúrát. Így építette fel *Ujhelyi* (2005) a tankönyvét. *Ujhelyi* ezeket következőképpen definiálta:

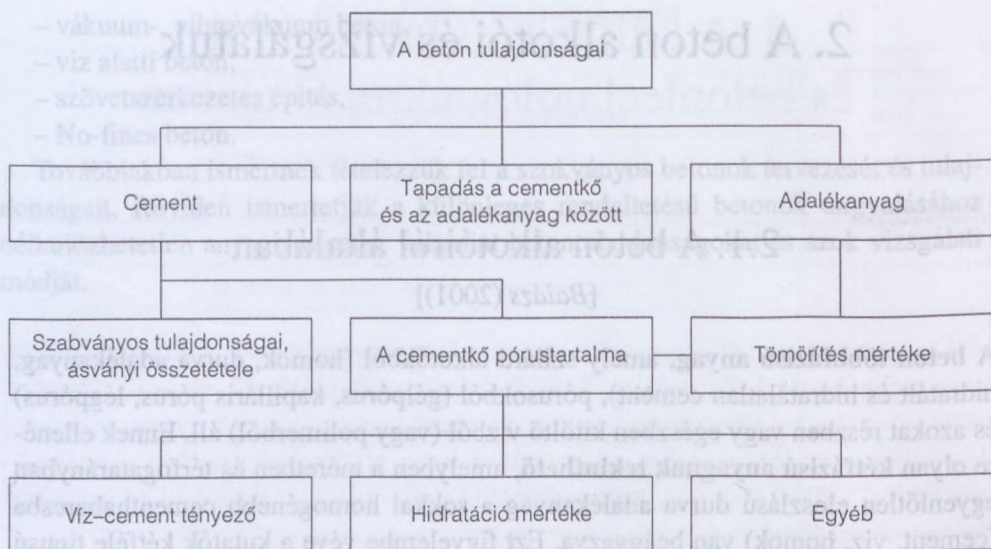
„**Makroszint**, amelynek méretrendje **mm** és **m** közötti. Ebbe tartozik az alkotó anyagok kg/m^3 -ben vagy l/m^3 -ben kifejezett összetételi aránya, tehát a cement-, az adalékanyag-, a kiegészítő anyag- és a víztartalom (kg/m^3 vagy l/m^3), a levegőtartalom (l/m^3) és az adalékszertartalom (általában a kötőanyag tömegszázalékában kifejezve). A makroszinthez tartoznak a durva hibák is.

Mezoszint, amelynek méretrendje **mikrométer** és **milliméter** közötti. Ebbe tartoznak a cement, a homok szemcséi, a szilárd beton pórusai és a légbuborékképző adalékszerrel képzett mesterséges légbuborékok, a cementkőváz és az adalékanyag határfelülete, a repedések kiinduló helyei, a mikrorepedések stb.

Mikroszint, amelynek a méretrendje az **Angström** (0,1 nanométer) és a **mikrométer** (1000 nanométer) között van. Ebbe tartoznak a cementkő fázisösszetételei, a rács-hibák, a gél belső fajlagos felülete, felületi területe, a diszlokációk, a gélpórusok stb.”

Kutatásaink során a betont kétfázisú anyagnak (cementkő, adalékanyag) tekintettük a 2.1. ábra szerint, figyelembe véve a cementkő és az adalékanyag közötti tapadást is.

A beton tulajdonságait elsősorban a cement (fajtája és mennyisége), az adalékanyag (fajtája és mennyisége) és a cementkő pórustartalma (víz–cement tényező, hidratáció mértéke) befolyásolja.



2.1. ábra. A beton szilárdságát és egyéb tulajdonságait befolyásoló tényezők [Balázs (1989)]

2.2. A cementek

2.2.1. A homogén portlandcementek és jellemzésük

[Balázs (1984), Powers (1956)]

Hazánkban csak portlandcementet gyártanak.

A **homogén portlandcementek** két fő alkotója: a klinkeren kívül a kötőanyag szabályozás céljából hozzáadott (4–5 m%) gipszkövet tartalmaznak, amelyet együtt finomra őrölnek.

A klinkert rendszerint természetes nyersanyagokból, hazánkban mészkőből és agyagból 1400–1450 °C-on zsugorodásig égetik. A portlandcement gyártásához felhasznált nyersanyag általában 70–80 m% mésztartalmú anyagot és 20–22 m% agyagot és legfeljebb kis mennyiségű $MgCO_3$ -ot és SO_3 -ot tartalmazhat. A mészkő a méz, az agyag a SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 bevitelére szolgál. Utóbbi alkotók bevitelét céljából homokot, lösz, traszt, kohósalakot és pernyét is használnak.

Azokat a portlandcementeket, amelyek legalább 5 m% hidraulikus kiegészítő anyagot (más néven hidraulikus pótlékot vagy hidraulitot) tartalmaznak, **heterogén portlandcementeknek** nevezzük, és a cement jelében a hidraulikus pótlék mennyisége és minősége is szerepel.

Különleges portlandcementeknek nevezzük azokat a portlandcementeket, amelyekkel különleges tulajdonságot (szulfátállóság, különböző szín, gőzölhetőség, nagy kezdeti szilárdság stb.) lehet elérni. Ezek is lehetnek homogén, ill. heterogén portlandcementek.

A homogén portlandcementek jellemezhetőek **klinker kémiai, ill. ásványi összetételével**. A jó minőségű portland-klinkerben az **alkotó oxidok** mennyisége a következő:

SiO ₂	19–24 m%
CaO	60–67 m%
SiO ₂	19–24 m%
Al ₂ O ₃ ,	2–8 m%
Fe ₂ O ₃	2–6 m%
MgO	1–5 m%
szabad CaO	0–2 m%
egyéb alkotók (Na ₂ O, K ₂ O, TiO ₂ , SO ₃ stb.)	0–3 m%

Mikroszkópi vizsgálattal a portlandcement-klinkerben négy fő fázis különböztethető meg, amelyeket **klinkerásványnak** nevezünk. A négy fő klinkerásvány a következő (A továbbiakban a szokásos rövidítéseket használjuk: C=CaO; S=SiO₂; A=Al₂O₃; F=Fe₂O₃; H=H₂O; CaSO₄=Cs; CH=Ca(OH)₂)

Alitnak (C₃S) nevezük a klinkerben hatszögű kristálykák alakjában előforduló Al³⁺- és Mg²⁺-ionokkal szennyezett trikálcium-szilikátokat. A C₃S=3CaO·SiO₂. Az alit a legfontosabb klinkerásvány, mivel ezzel lehet elérni a nagy kezdőszilárdságot. A cementben részaránya 37–60 m%.

A *belit* (C₂S) a klinkerben kerekded kristályoknak látszó dikalcium-szilikát (2CaO·SiO₂), amely kis mennyiségben szintén tartalmaz különböző ionokat. Négy módosulata van. Ezek közül legfontosabb a β(béta)-módosulat, amely lassú kezdeti szilárdulást, kedvező utószilárdulást, kicsi hidratációhőt okoz. Kedvezően befolyásolja a kezdeti húzószilárdságot. Mennyisége 15–37 m%.

A *trikalcium-aluminát* (3CaO·Al₂O₃, rövidített jele: C₃A) a klinkerásványok közül a leggyorsabban köt és a legtöbb hőt fejleszti. Ezt a túlzottan gyors kötést lassítják a portlandcementhez adott örölt gipszkövel. Mennyisége a cementben általában 7–15 m%. Azokat a cementeket, amelyekből a C₃A hiányzik vagy kevés, szulfátálló cementeknek nevezük.

A *tetrakalcium-aluminát-ferrit* (4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃, rövidítése C₄AF, neve celit) hidratált termékei a legkisebb szilárdságúak a klinkerásványok közül. Lassan kötő anyag, szulfátellenállása kedvező.

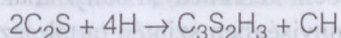
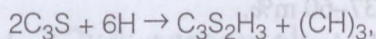
A klinkerásványok között megfigyelhető az *üvegfázis* is, amelynek az összetétele nagyon változó és attól függ, hogy milyen alkotók kristályosodtak ki lehűlés közben.

A vízzel összekevert cementet (ez a heterogén cementre is igaz) **cementpépnek** nevezük. A keverővízre a szilárduláshoz és a bedolgozáshoz van szükség. Minél több a keverővíz, annál nagyobb a víz–cement tényező (m_w/m_c), azaz a víz és cement tömegének hányadosa, annál könnyebben bedolgozható a cementpép, de a fölös víz helyén a kiszáradáskor annál több légpórus, kapillaris pórus keletkezik, annál kisebb lesz a megszilárdult cementpép szilárdsága és romlik egyéb tulajdonsága is.

A cementpép a végbemenő igen bonyolult fizikai-kémiai folyamatok hatására először elveszíti képlékeny állapotát, majd egyre inkább nő a szilárdsága. Az első állapot addig tart, amíg a cementpép körömmel karcolható. Ez a **kötési folyamat**. Az utána következő folyamat neve **szilárdulás**. Ezen általában 28 napig bekövetkező szilárdságnövekedést értünk. 28 nap után bekövetkező szilárdságnövekedés az **utószilárdulás**.

A kötés és a szilárdulás azonos jellegű, egymásba átmenő folyamat. A víz hatására ugyanis az égetés folyamán keletkező klinkerásványok (kalcium-szilikátok, kalcium-aluminátok stb.) szilánkosodnak, felhasadnak és a vizet kalcium-szilikát-hidrátok, ill. kalcium-aluminát-hidrátok alakjában megkötik. Ezt a folyamatot közös néven **hidratációnak** nevezzük. A hidratáció során először telített, majd túltelített kolloidális oldat keletkezik. A cementszemcsék felületén vékony kocsonyaszerű anyag, gélréteg jön létre, amelyből idővel (éveken át) kristályok keletkeznek. A cementpép e folyamat hatására először megdermed, majd fokozatosan kőszzerűvé válik, aminek **cementkő** a neve. A hidratáció termodinamikai magyarázata az, hogy szobahőmérsékleten metastabil állapotú klinkerásványok vízzel egyesülve, stabil hidratvegyületekké alakulnak át.

A cementkő szilárdságát lényegében a C_3S és βC_2S klinkerásványok szilárdulása során keletkező kalcium-szilikát-hidrátok adják. A feltételezett reakció:



klinker- ásvány	víz	kalcium- szilikát-hidrát	mész
--------------------	-----	-----------------------------	------

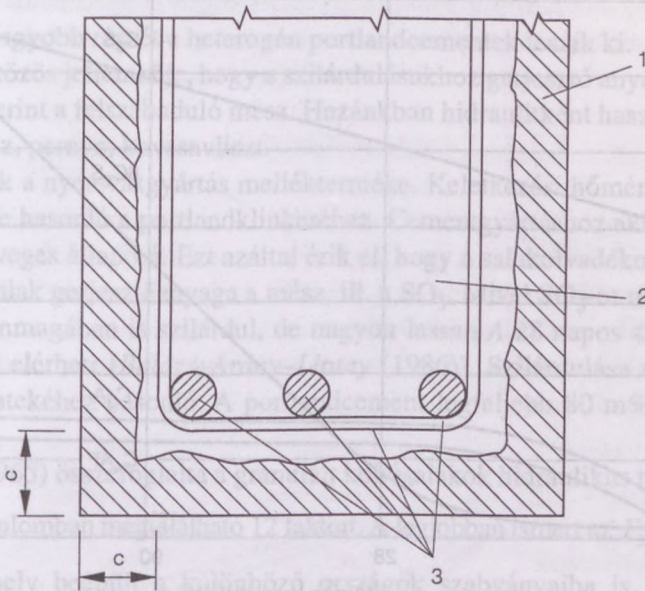
E képletekből alábbi következtetéseket vonjuk le:

A **cementkő**, ill. a **beton szilárdságának a hordozói a kalcium-szilikát-hidrátok** ($C_3S_2H_3$). Ezek igen nagy fajlagos felületűek, 20–30 ezerszeres nagyításban elektronmikroszkópban réteges felépítésű, tű és lécszerű kristályoknak látszanak. Mindkét klinkerásványból ugyanaz keletkezik és mindaddig stabilak, amíg a pH a környezetükben 7 alá nem csökken.

A szilárdulás során nagy mennyiségű, a felhasznált cement tömegére vonatkoztatott 15–20% $Ca(OH)_2$ keletkezik. Ez 12–14 pH-jú lúgos környezetet hoz létre, amely egyik feltétele a vasbeton szerkezetben levő **acélbetét korrózió elleni védelmének**. A beton felületén azonban ez a kalcium-hidroxid $CaCO_3$ -tá alakul át, amely 7 pH-jú. Ez az acél védelméhez kevés. Az acélbetétet tehát olyan mélyen kell elhelyezni a betonban, hogy ott a karbonátosodási folyamat már ne menjen végbe. Ezt a szükséges vastagságot **betonfedésnek** nevezzük (2.2. ábra). Minimális vastagsága – a legújabb szabványok szerint vasbeton esetén 20 mm, feszített vasbeton esetén 45 mm. Függ természetesen a beton porozitásától és egyéb körülményektől is, pl. víz hatására a kalcium-hidroxid könnyen kioldódik a betonból.

A szilárdulás során felszabaduló $Ca(OH)_2$ hasznosítható úgy, hogy a cementben a klinker egy részét (savanyú, a hidratáció során felszabaduló mésszel reakcióba lépő)

hidraulitokkal, másnéven hidraulikus pótlékokkal helyettesítik. Az ilyen cementet *heterogén cementnek* nevezzük.

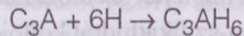
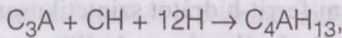


2.2. ábra. A karbonátosodás és a betonfedés kapcsolata.

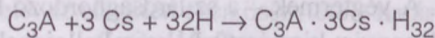
1 – karbonátosodott rész (pH = 7); 2 – nem karbonátosodott rész (pH = 12–14);
3 – acélbetétek; c – betonfedés

A mész-kovavas reakció nem aktív kovavasval (pl. kvarchomok) 176 °C-nál nagyobb hőmérsékleten szintén végbemegy, és nő a cementkő szilárdsága. Ezt a technológiát **autoklavolásnak** nevezzük.

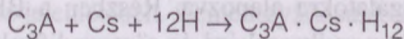
Ha a cementben gipsz nem volna, akkor a C_3A és a víz reakciójából



hidrátok keletkeznének. A gyors kötés megakadályozására adagolt gipsszel közvetlenül a keverést követő percekben, duzzadás közben, **ettringit** keletkezik:

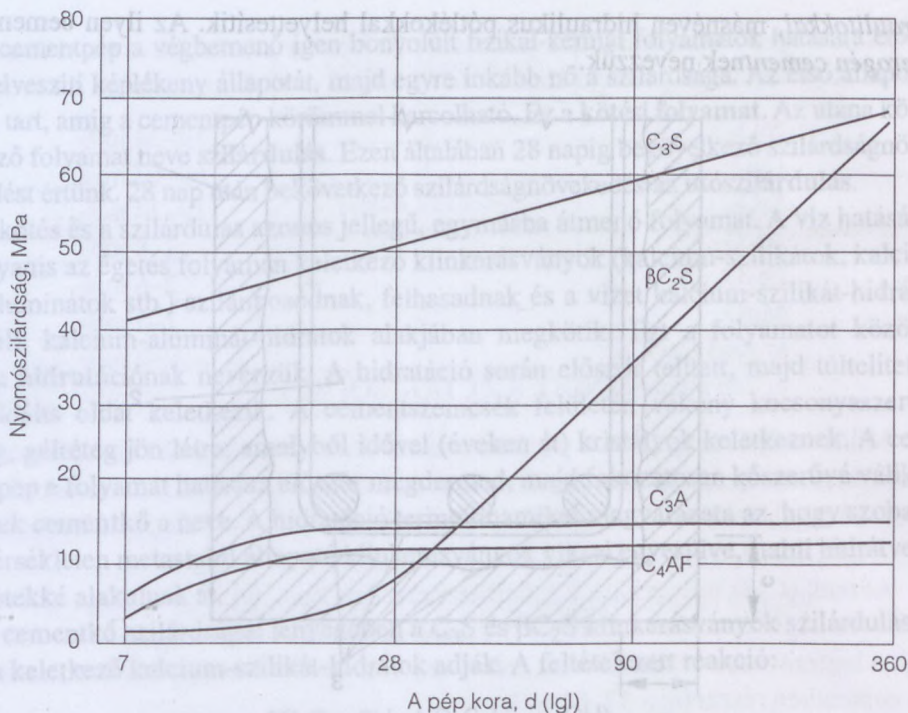


Hatszöges rendszerben kristályosodik és már 1000-szeres nagyításban is jól látható. Keletkezik még



monoszulfát is, ill. kevesebb hidrátvizet tartalmazó vegyület. Az ettringit nem stabil hidrát, túlnyomórészt monoszulfáttá kristályosodik át.

A klinkerásványok nyomószilárdságának időbeli alakulását a 2.3. ábra szemlélteti.



2.3. ábra. A klinkerásványok szilárdságának időbeni alakulása

Le Chatelier optikai eszközök segítségével 1887-ben kifejthette a **cementszilárdulás kristályelméletét**. Kimutatta, hogy a cement nem egységes, hanem különböző fázisokból áll (C₃S, βC₂S, C₃A, C₄AF), legfontosabb a C₃S és a C₂S. Határozottan állította, hogy a C₂S-nek az égetéstől függően különböző kötőképeségű módosulatai keletkeznek. Tanulmányozta az összes klinkerfázis hidratációját, a kalcium-szilikát-hidrátot, és a tetrakalcium-ferrit-hidrátot szintetikusán is előállította.

Michaelis 1893-ban a kristályelmélettel szembeállította a **cementszilárdulás kolloid elméletét**, amely szerint a kalcium-szilikáthidrát kolloid természetű és a cementpép szilárdulását a kolloid részecskék összetapadása okozza. A két elmélet hívei hosszú ideig vitatkoztak, míg végül az elektronmikroszkóp segítségével ma már tudjuk, hogy mindkét szerzőnek igaza van. A végtermék – a szilárdsághordozó kalcium-szilikáthidrát – kristályos, de a kristályok annyira kicsik, hogy kolloidnak tűnnek. Ezt az elméletet *Powers* (1964) ismertette először 1945-ben. 1938-ban *Brunauer–Emmett–Teller* (1938) kifejthették **multimolekuláris abszorpciós elméletüket** az általuk kifejlesztett készülékkel végzett vizsgálatokra alapozva. Részben a BET (nevük kezdőbetűje) készülékkel, részben elektronmikroszkópi és röntgendiffrakciós vizsgálatokkal vált lehetővé a cementkőben lévő tobermorit szerkezetének a jobb megismerése.

Végül *Tamás* (1977) a cement hidratációját mint **polimerizációs** folyamatot ismertette új elméletében.

2.2.2. A heterogén portlandcementek és jellemzésük

[Balázs (1984)]

Cementjeink nagyobb részét a heterogén portlandcementek teszik ki.

A hidraulitok közös jellemzője, hogy a szilárdulásukhoz gerjesztő anyagra van szükség. Ez rendszerint a felszabaduló mész. Hazánkban hidraulitként használt anyagok: kohósalak, trasz, pernye, kovasavliszt.

A **kohósalak** a nyersvasgyártás mellékterméke. Keletkezési hőmérséklete és kémiai összetétele hasonló a portlandklinkeréhez. Cementgyártáshoz akkor jó, ha legalább 90%-a üveges állapotú. Ezt azáltal érik el, hogy a salakolvadékot hideg vízzel hűtik. A kohósalak gerjesztőanyaga a mész, ill. a SO_3 . Mivel SO_3 -ot rendszerint tartalmaz, ezért önmagában is szilárdul, de nagyon lassan A 28 napos szilárdságának többszörösét is elérheti [Balázs–Arany–Liptay (1986)]. Szilárdulása a nagy $\beta\text{C}_2\text{S}$ -tartalmú cementekéhez hasonló. A portlandcement legfeljebb 80 m% kohósalakot tartalmazhat.

Smolczyk (1965) összefoglalta a granulált kohósalakok hidraulikus tulajdonságait kifejező, az irodalomban megtalálható 12 faktort. A legjobban ismert az $F_3 = \frac{C + A + M}{S}$

jelű faktor, amely beépült a különböző országok szabványaiba is. Az F_3 -ra az NSZK-ben 1,0-et, Japánban 1,4-et írnak elő alsó határként. Smolczyk azonban azt is hangsúlyozta, hogy a szokásos faktorok segítségével sem a végszilárdság, sem a salakok rejtett hidraulikus tulajdonsága nem becsülhető meg egyértelműen, hanem e faktorok inkább az egy acélműből érkező kohósalakok ellenőrzésére alkalmasak.

Többen hangsúlyozzák, hogy cementkövük tömörebb a homogén portlandcementénél, mert kapilláris porozitásuk kisebb [VI. Internationaler ... (1975)]

Trasz a vulkáni tufák cementfinomságú őrlménye. A traszban lévő aktív kovásv (aktívnak nevezzük az SiO_2 -ot, ha mésszel szobahőmérsékleten reakcióba tud lépni) a cementben lévő szabad mésszel és a cement szilárdulása során felszabaduló CH-dal szintén kalcium-szilikát-hidrátot (CSH) alkot, s ezáltal növeli a cementkő szilárdságát. Trasszal legfeljebb a klinker 20 m%-a helyettesíthető, mivel különben a pH-érték nagyon lecsökken.

A **pernye** porszéntüzelésű erőművi kazánok hamuja. Kiegetési hőmérséklete 1100–1300 °C. Összetételét az elégetett szén összetétele határozza meg. Bázikusnak

nevezzük a pernyét, ha benne a $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$ egynél nagyobb és savanyúnak nevezzük, ha egynél kisebb. A bázikus pernye önmagában is szilárdul, a savanyú pernye csak a traszhoz hasonlóan, mész jelenlétében. Cementgyártásunk során savanyú pernyéket használunk fel. A portlandcement legfeljebb 35 m% savanyú pernyét tartalmazhat.

A **kovasavliszt** (silica fume, szilikapor) a vasötvetgyártás mellékterméke (mesterségesen is előállítják). Fajlagos felülete, kb. 20 000 cm^2/g , aktív kovasavtartalma lényegesen nagyobb (<90 m%), mint a pernyéé. A szilárdulás során felszabaduló CH-dal

szintén CSH-ot hoz létre. Adagolt mennyisége a cementre vonatkoztatva 8–10 m%, mert igen nagy a vízigénye.

Általában figyelembe kell venni, hogy a heterogén portlandcementek lassabban szilárdulnak, mint a tiszta portlandcementek és hidegérzékenyebbek.

2.2.3. A cementszilárdulás sebessége

A portlandcement hidrátjai időbeni kialakulását *Locher* és *Richartz* (1965, 1974) szerint szobahőmérsékleten a 2.4. ábra felső része szemlélteti. Az első, kezdeti szakaszra az ettringit képződése a jellemző. A második szakaszban hosszúrostú, a harmadik szakaszban pedig a rövidrostú kalcium-szilikát-hidrátok képződése a legfontosabb.

A **hidratáció sebessége, azaz a cementszilárdulás** időbeli alakulása a következőkkel befolyásolható:

Befolyásoló tényező	Gyorsít	Lassít
a) szemnagyság	finomőrlés	durvaőrlés
b) frissbeton hőmérséklete	hőérlelés	hűtés
c) kémiai adalékszerek	CaCl ₂	bórax
	AlCl ₃	dextrin
	Na ₂ CO ₃	cukor
		citromsav

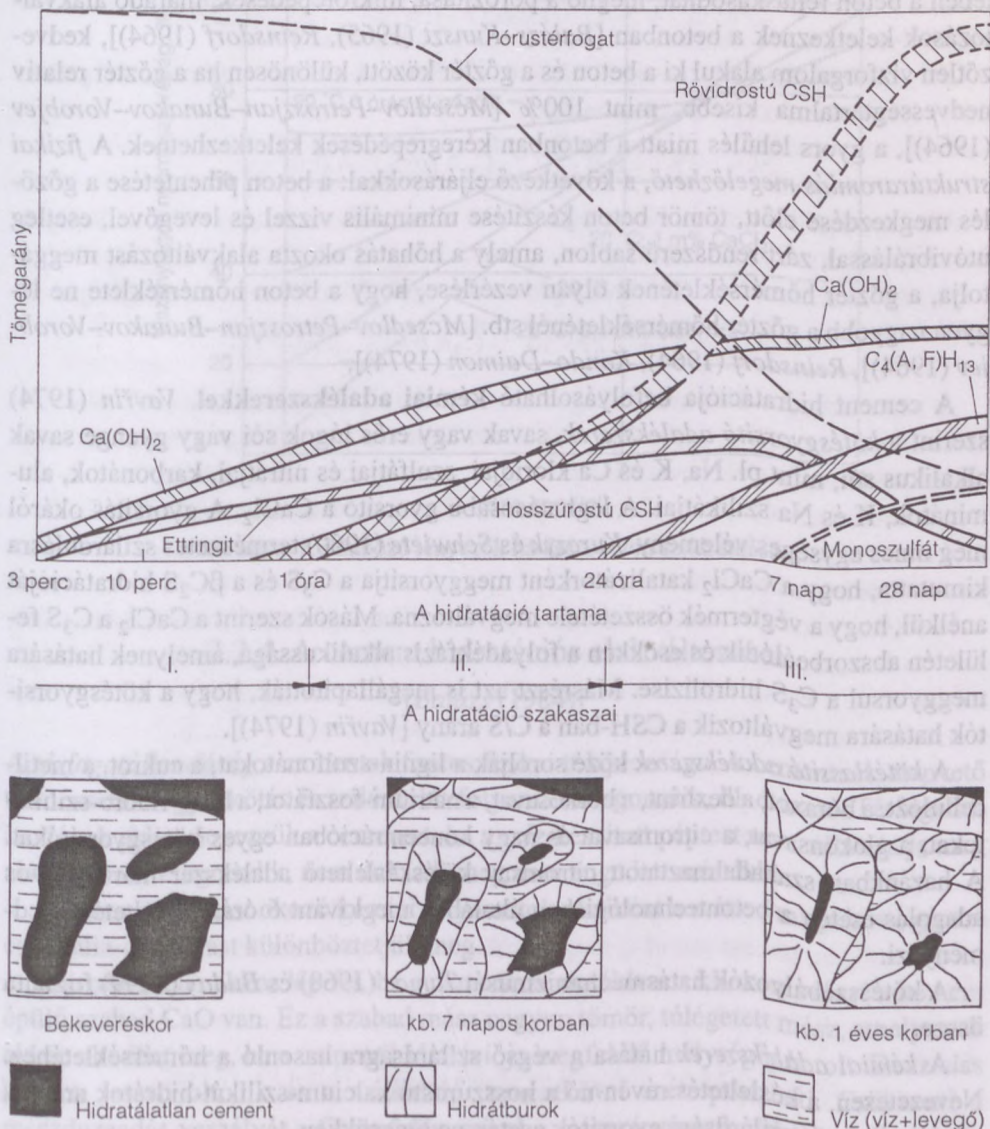
A **cement szemnagyságának** hatása azzal magyarázható, hogy a hidratáció a szemcsék felületén indul meg, és a víz lassan diffundál a szemcsék belseje felé. A szemcseméret szerepe kettős. Egyrészt a kezdeti hidratáció, a cement kezdeti szilárdsága a cement fajlagos felületével arányos, tehát a finomőrlésű cementé nagyobb, mint a durvaőrlésűé, másrészt a finomabbra őrlt cementnek nagyobb lesz a végszilárdsága is. Ugyanis a cementszemcsék felületén kialakuló hidratált kéregrész meggátolja, hogy a cement belseje is vízhez jusson. Ezáltal a kb. 30 µm-nél nagyobb átmérőjű szemcsék belseje nem vesz részt a szilárdulásban, a cement magja úgy viselkedik, mintha töltőanyag (pl. homok) lenne (2.4. ábra). Ebből az is következik, hogyha a beton megreped, s utána a repedés zárul, akkor durvább őrlésű cementek esetében az átrepedt cementszemcsékben a hidratáció folytatódhat, a repedés összehegedhet.

A **hőmérséklet hatása** úgy érvényesül, mint a vegyi folyamatoknál általában. Nevezetesen: a meleg gyorsítja, a hideg lassítja a szobahőmérsékleten végbemenő hőz képest a szilárdulási folyamatot.

Leggyakoribb a szilárdulás gyorsítása **gőzöléssel**. A szilárdulás során – hidegben és melegben – közel azonos összetételű kalcium-szilikát-hidrátok keletkeznek, de kisebb hőmérsékleten több hosszúrostú C₃S₂H₃ kristály keletkezik, ami nagyobb 28 napos szilárdságot eredményez. Nagy (60–80 °C) hőmérsékleten, így a gőzöléses

szilárdítás során, fordított a helyzet. A 28 napos és a végszilárdság csökken a szoba-hőmérsékleten tárolt cementéhez képest.

Általában ismert, hogy a *homogén portlandcementtel készített gőzölt beton 28 napos szilárdsága kisebb, mint a természetesen szilárdulóé*. Ennek mind kémiai, mind fizikai oka lehet, de a fizikait tartják döntőnek.



2.4. ábra. A hidrattermékek időbeni kialakulása.
[Locher-Richartz (1974)]

Kémiai oka az, hogy a hidratációfolyamat hirtelen gyorsítása következtében durvább, rövid rostú szövetszerkezet alakul ki, a hidratálatlan cementszemcsén hidratburok jön létre, amely fékezi a további hidratációt [Vénuat (1974), Berkovics és társai (1964), Ost (1974), Seikin (1957)].

Fizikai oka az, hogy nagy a különbség a beton alkotóelemeinek (adalékanyag, cementpép, víz, levegő) hőtágulási együtthatója között, és a gyors felfűtés következtében a beton feltáskásodhat, megnő a porozitása, mikrorepedések, maradó alakváltozások keletkeznek a betonban [Balázs–Kunszt (1965), Reinsdorf (1964)], kedvezőtlen vízforgalom alakul ki a beton és a gőztér között, különösen ha a gőztér relatív nedvességtartalma kisebb, mint 100% [Mcsedlov–Petroszjan–Bunakov–Vorobjev (1964)], a gyors lehűlés miatt a betonban kéregrepedések keletkezhetnek. A *fizikai struktúraromlás megelőzhető*, a következő eljárásokkal: a beton pihentetése a gőzölés megkezdése előtt, tömör beton készítése minimális vízzel és levegővel, esetleg utóvibrálással, zárt rendszerű sablon, amely a hőhatás okozta alakváltozást meggátolja, a gőztér hőmérsékletének olyan vezérlése, hogy a beton hőmérséklete ne legyen nagyobb a gőztér hőmérsékleténél stb. [Mcsedlov–Petroszjan–Bunakov–Vorobjev (1964)], Reinsdorf (1964), Kondo–Daimon (1974)].

A cement hidratációja befolyásolható **kémiai adalékszerekkel**. Vavřin (1974) szerint a *kötésgyorsító adalékszerek*, savak vagy erős lúgok sói vagy gyenge savak alkalikus sói, mint pl. Na, K és Ca kloridjai, szulfátjai és nitrátjai, karbonátok, alumínátok, K és Na szilikátjai. A leghatásosabb gyorsító a CaCl_2 . A gyorsítás okáról még nincs egységes vélemény. Kurczyk és Schwiete (1960) természetes szilárdulásra kimutatta, hogy a CaCl_2 katalizátorként meggyorsítja a C_3S és a $\beta\text{C}_2\text{S}$ hidratációját anélkül, hogy a végtermék összetétele megváltozna. Mások szerint a CaCl_2 a C_3S felületén abszorbeálódik és csökken a folyadékfázis alkalikussága, amelynek hatására meggyorsul a C_3S hidrolízise. Másrészt azt is megállapították, hogy a kötésgyorsítók hatására megváltozik a CSH-ban a C/S arány [Vavřin (1974)].

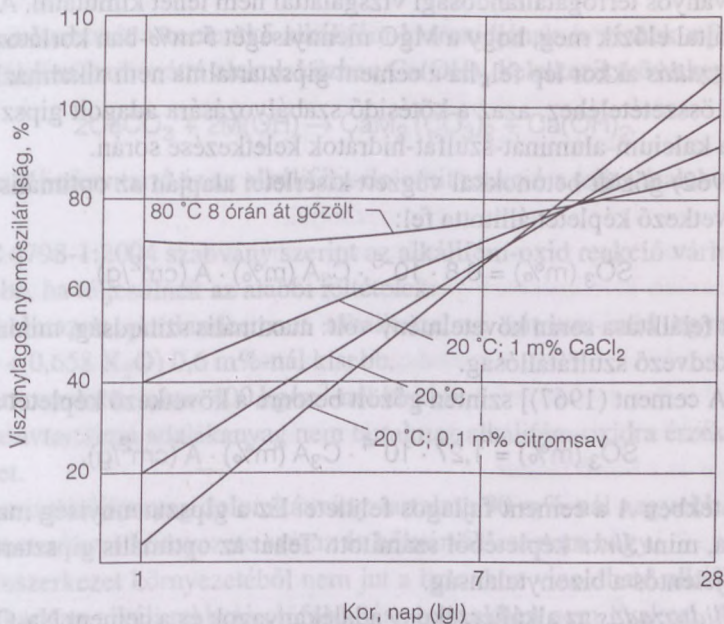
A *kötésslassító adalékszerek* közé sorolják a lignin-szulfonátokat, a cukrot, a metilcellulózt, a bóraxot, a dextringet, a borkősavat, a nátrium-foszfátot, a hexa-fluoro-szilikátokat, a glukonsavat, a citromsavat és nagy koncentrációban egyes kötésgyorsítókat. A hazánkban szabadalmaztatott citromsav kötékésleltető adalékanyag már 0,1%-os adagolás esetén a betontechnológiában általában megkívánt 6 órás késleltetést eredményezi.

A kötésszabályozók hatásmechanizmusát Tamás (1968) és Buday (1999) foglalta össze.

A *kémiai adalékszerek* hatása a végső szilárdságra hasonló a hőmérsékletéhez. Nevezetesen, a késleltetés révén nő a hosszúrostú kalcium-szilikát-hidrátok aránya, növekszik a végszilárdság, gyorsítók esetén pedig csökken.

Összefoglalóan azt mondhatjuk, hogy *mindazok a tényezők* (kezdeti hideg tárolás, kötékésleltetők), amelyek elősegítik a hosszúrostú kalcium-szilikát-hidrátok keletkezését, növelik a cementkő (beton) végszilárdságát. Ha pedig nagy hőmérsékletű érle-

léssel vagy kötégysítőkkel a rövidrostú kalcium-szilikát-hidrátok keletkezését segítjük elő, meggyorsul ugyan a kezdeti szilárdulás, de csökken a végszilárdság. Ezt szemléltetjük a 2.5. ábrán.



2.5. ábra. Különböző tényezők hatása a beton szilárdulására

2.2.4. A cement hidratációs alakváltozásai

[Balázs (1984)]

A *térfogatállandóság* a cementek fontos fizikai tulajdonsága. A cementnek alapvető természete, hogy a kötés és szilárdulás folyamán zsugorodik, ill. duzzad. Térfogatállandónak akkor nevezzük a cementet, ha a vele készített péptest nem változtatja meg alakját (nem zsugorodik, nem duzzad) meg nem engedett mértékben.

A káros duzzadást okozó kémiai folyamatok okaiként a mész-, magnézium-, gipsz- és alkália-duzzadást különböztetjük meg.

Mészduzzadás akkor lép fel, ha a cementszemcsékben a klinkerásványba be nem épülő szabad CaO van. Ez a szabad mész nagyon tömör, túlégetett mész, amely csak akkor oltódhat meg, ha a cement hidratációja megfelelő mélységig hatolt. Duzzadás közben lassan oltódik és a szilárduló cementkővet szétrepesztheti. Csökkenti a mészduzzadás veszélyét a finomörlés, mivel a mészásványok ritkábban fordulnak elő, és a víznek a mészásványig kisebb utat kell megtennie. A cementben az 1 m%-nál kisebb szabad CaO-tartalmat nem tartják veszélyesnek. A mészduzzadás veszélyét szabványos térfogatállandósági vizsgálattal lehet kimutatni.

A magnéziaduzzadást a klinkerben levő szabad MgO okozza. A klinkerégetés hőmérsékletén agyonégetett magnézia keletkezik, amely a mésznél sokkal lassabban oltódik, és az oltódással járó duzzadás csak évek múlva jelentkezik. A duzzadásveszélyt szabványos térfogatállandósági vizsgálattal nem lehet kimutatni. A duzzadásveszélyt azáltal előzik meg, hogy a MgO mennyiségét 5 m%-ban korlátozzák.

Gipszduzzadás akkor lép fel, ha a cement gipsztartalma nem alkalmazkodik a cement vegyi összetételéhez, azaz a kötésidő szabályozására adagolt gipsz nem használandó el a kalcium-aluminát-szulfát-hidrátok keletkezése során.

Jirku (1962) gőzölt betonokkal végzett kísérletei alapján az optimális SO₃-tartalomra a következő képletet állította fel:

$$\text{SO}_3 \text{ (m\%)} = 6,8 \cdot 10^{-5} \cdot \text{C}_3\text{A (m\%)} \cdot A \text{ (cm}^2\text{/g)}.$$

A képlet felállításánál követelmény volt: maximális szilárdság, minimális gipszduzzadás, kedvező szulfátállóság.

Révy [A cement (1967)] szintén gőzölt betonra a következő képletet ajánlja:

$$\text{SO}_3 \text{ (m\%)} = 1,27 \cdot 10^{-4} \cdot \text{C}_3\text{A (m\%)} \cdot A \text{ (cm}^2\text{/g)}.$$

A képletekben *A* a cement fajlagos felülete. Ez a gipsz mennyiség majdnem kétszer akkora, mint Jirku képletéből számított. Tehát az optimális gipsztartalom megítélésében jelentős a bizonytalanság.

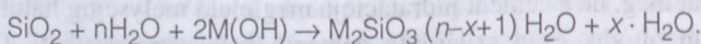
Az alkáliduzzadás az alkáliérzékeny adalékanyagok és a cement Na₂O és K₂O alkotói között fellépő kölcsönhatás eredménye. A folyamat a két anyag határfelületén játszódik le következők szerint.

A cement alkálifém-tartalma és bizonyos adalékanyagfajták közötti reakció révén a beton duzzad, és a betonzástól számított évek múltán mozaikszerű repedések jelennek meg a beton felületén és belsejében, a beton tönkremegy. Az ilyen betont nem lehet javítani.

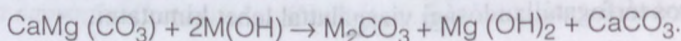
Az alkálifémek közül a cementben a Na (nátrium) és a K (kálium) fordul elő. A reakciónak két alapvető típusát

- az alkálifém-oxid-szilikát és
- az alkálifém-oxid-karbonát

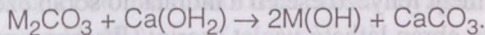
reakciót különböztetjük meg. A kovasavas adalékanyag alkotó az adalékanyagnak a nem kristályos, hanem amorf (pl. opál, kalcedon) része. A reakcióból gélyszerű, duzzadó anyag (nátrium esetén vízüveg) jön létre. A reakció képlete (az alkálifémet közösen M-mel jelölve)



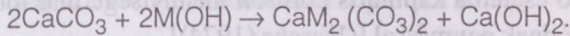
Az alkálifém-oxid-karbonát reakció meszes vagy agyagos-köves-meszes dolomitok esetében fordul elő. A dolomitból alkálifém-karbonát, magnézium-hidroxid (brucit) és kalcium-karbonát keletkezik.



A keletkezett M_2CO_3 a cementkő szilárdulása során felszabaduló mésszel $[Ca(OH)_2]$ reagálva vissza alakulhat alkálifém-hidroxiddá:



A kalcium-karbonát a cementkő alkálifém-hidroxidjának és víznek a jelenlétében kalcium-alkálifém-karbonáttá alakul, közben $Ca(OH)_2$ keletkezik következők szerint:



A folyamat önfenntartó és az alkálifém-dolomit reakció a teljes átalakulásig folytatódhat.

Az MSZ 4798-1:2004 szabvány szerint az alkálifém-oxid reakció várhatóan nem következik be, ha teljesülnek az alábbi feltételek:

- Az alkalmazott portlandcement alkálitartalma nátrium-oxid egyenértékben ($Na_2O + 0,658 K_2O$) 0,6 m%-nál kisebb.
- A beton cementtartalma 400 kg/m^3 -nél kisebb.
- A kovasavtartalmú adalékanyag nem tartalmaz alkálifém-oxidra érzékeny amorf részeket.
- A dolomit adalékanyag dolomitásvány-tartalma 90 m%-nál nagyobb.
- A betonszerkezet környezete száraz és hőmérséklete nem nagy.
- A betonszerkezet környezetéből nem jut a betonhoz vízoldható alkálifém-oxid.

Az adalékanyag-alkáli reakció előfordulása hazánkban nem gyakori. A korszerű cementgyártással nőtt a veszélye. A dolomitokat Puskás Bné (1983) vizsgálta. Bányanyitáskor és nedvesség hatásának kitett tartós szerkezetek tervezésekor különös gondtal kell az alkálireakció veszélyét megvizsgálni.

2.2.5. A cementkő porozitása és tulajdonságai

2.2.5.1. A porozitás fogalma

[Balázs (2001)]

A cementkő, amely a betonban az adalékanyag-szemcséket összeragasztja, a beton térfogatának harmadát-egyedét teszi ki, nagy porozitású anyag.

A beton tulajdonságai szempontjából nagy szerepe van a cementkő pórusszerkezetének. A pórusok átmérő szerinti felosztása nem egységes. Elfogadhatónak látszik a következő felosztás [Wesche (1974), Powers–Brownyard (1946, 1947), Powers (1949), 1964]:

Gélpórusoknak nevezzük a cementgélben lévő és a mikrokristályos hidráttermékek közti teret, amely a cement és a keverővíz reakciója során keletkezik. Átmérőjük 1–10 nm. A gélporozitás kb. 30 V%. Jóllehet a gélpórusokban lévő víz $100 \text{ }^\circ\text{C}$ -nál nagyobb hőmérsékleten elpárolog, azon vitatkoznak, hogy ezt szabad víznek kell-e tekinteni vagy a cementkő szilárd fázisához kell-e számítani.

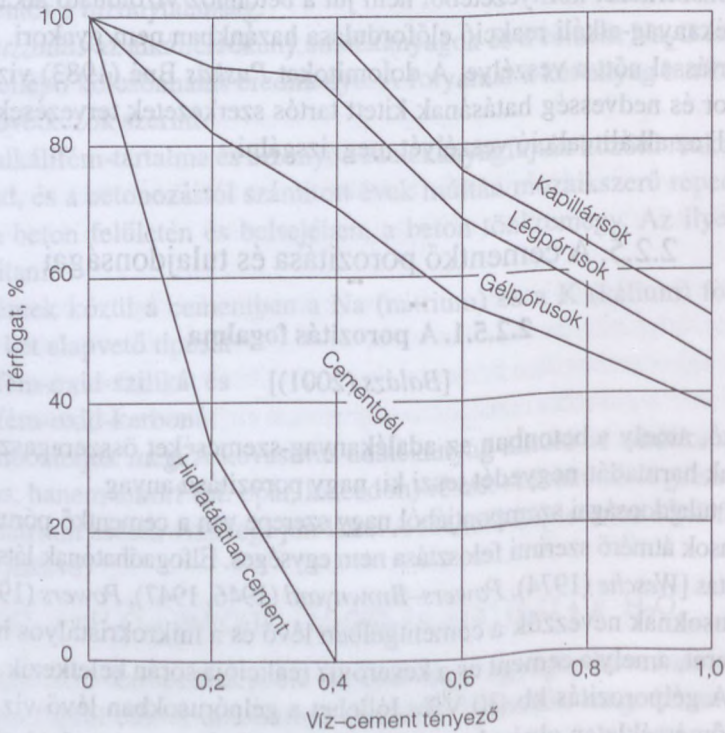
Kapillaris pórusoknak az eredetileg keverővízzel töltött, egymással és a beton felszínével összeköttetésben lévő csatornákat nevezzük. Átmérőjük 20 nm–10 μm . 0,40-nél kisebb víz-cement tényező esetén a hidratáció során ezek hidráttermékekkel töltődhetnek meg a 2.6. ábrán látható vázlat szerint (*Wesche* a gélpórusok mennyiségét alábecsülte). Tehát az, hogy marad-e kapillaris pórus, elsősorban a víz-cement tényezőtől, valamint a hidratáció mértékétől, tehát a nedves utókezeléstől függ. 0,6-os víz-cement tényező esetén a kapillaris pórusok mennyisége már több 20 V%-nál, és ezek összekapcsolódnak egymással [(*Wesche* (1974))].

A kapillaris porozitást, amelyet látszólagos porozitásnak is nevezünk, a vízfelvéttel (fokozatos vízbemerítéssel) jellemezhetjük.

A **légpórusok** vagy péptelítetlenség, vagy a hiányos tömörítés következményei, vagy tervszerűen keletkeznek légbuborékképző adalékszerek által. Utóbbiakat légbuboréknak nevezzük és ezek átmérője 20–300 μm , míg a hiányos tömörítés miattiak ennél nagyobbak és több mm vastagok vagy átmérőjük lehetnek.

A legújabb ismeretek szerint a **pórusrendszert** a teljes porozitással, a pórusméret-eloszlással és a pórusgeometriával lehet jellemezni. A hozzákapcsolódó értékek a pórusugár és a belső felület.

A kapillaris porozitás pórusátmérő szerinti felosztására több javaslat született, legjobbnak a 2.1. táblázat szerinti ítéljük.



2.6. ábra. A víz-cement tényező hatása a cementkö összetételére [(*Wesche* (1974))]

A kapilláris porozitásnak azért van nagy jelentősége, mert ezeken a pórusokon keresztül „lélegzik” a beton, vizet vesz fel (vízzel telítődik), vizet ad le (kiszárad), ezeken keresztül jutnak a betonba a korróziót okozó anyagok (agresszív folyadékok, sók, légszennyező anyagok stb.).

A pórusok méret szerinti eloszlását kb. 30 nm-ig szorpciós eljárással, 4 nm–1 µm-ig higanyos poroziméterrel szokás meghatározni.

A teljes porozitás számítható a következő képletből is:

$$p = \left(1 - \frac{\rho_t}{\rho} \right) \cdot 100,$$

ahol p a porozitás, V%

ρ_t a cementkő (beton) testsűrűsége, kg/m³

ρ a cementkő (beton) sűrűsége, kg/m³.

A cementkő porozításától döntően függ a cementkő minden tulajdonsága.

Egyébként a betonstruktúra vizsgálatának a módszereit, ezek korlátait *Ujhelyi* (2005), *Popovics* (1998) részletesen elemezte.

2.2.5.2. A porozitás és a szilárdság

[*Balázs* (2001)]

Ismeretes, hogy minél tömörebb a beton, annál nagyobb a testsűrűsége, és ezzel arányosan nő a beton nyomószilárdsága és valószínűen a húzószilárdsága is. A 60-as években sok kutatás foglalkozott a nagytömörségű cementpékekkel. E kutatások célja kétirányú volt: egyrészt a nagytömörségű cementpépek előállítására és vizsgálata útján keresték azt a cementvizsgálati eljárást, amellyel a cementet 1 napos korban minősíteni lehet, másrészt célja volt a porozitás és a cementkő tulajdonságai közötti összefüggés és a cementkő, ill. a beton határszilárdságának a megállapítása.

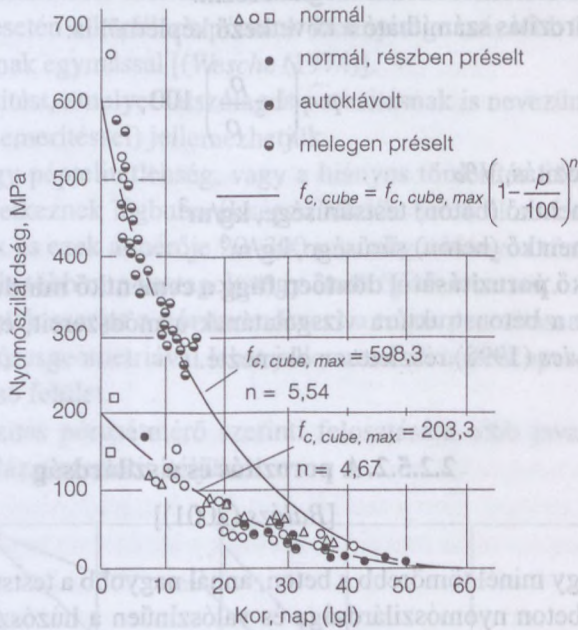
E témakörben végzett kutatások közül *Lawrance* (1968), *Idorn* (1969), *Ben-nett–Gukhale* (1967), *Gaca* (1965), *Skalny* és *Bajza* (1970), a hazai kutatók közül *Nagyné* (1965) és *Kilián* (1970, 1967) kutatási eredményeit említjük meg.

Powers szerint, és ezt a különböző kutatók által elvégzett kísérletek is igazolták (2.7. ábra alsó görbe), a cementkő nyomószilárdsága a pórusmentesnek feltételezett cementkő nyomószilárdságától és a cementkő porozításától (kapilláris és légpórusok) függ. Ezenkívül a cement fajtájának és az érlelés körülményeinek (természetes szilárdulás, gőzölés, autoklaválás) van szerepe annyiban, amennyiben a porozitást befolyásolják. A hidratálatlan cementrészek nem rontják a szilárdságot, mivel azok szilárdsága a bazaltéval egyezik meg. A kockaszilárdság ($f_{c, cube}$) kifejezhető következőképpen:

$$f_{c, cube} = f_{c, cube \max} \left(1 - \frac{p}{100} \right)^n.$$

ahol $f_{c, cube, max}$ a pórusmentesnek feltételezett cementkő kockaszilárdsága;
 p a porozitás, V%;
 n a hatványkitevő.

A 2.7. ábra felső vonaláról az is leolvasható, hogy melegen sajtolt, igen kis porozitású pépekkel igen nagy szilárdság érhető el.



2.7. ábra. A porozitás hatása a cementkő nyomószilárdságára [VI. Internationaler (1975)]

Ebből a képletből a víz–cement tényező és a hidratációfok befolyása is levezethető, mivel a porozitás függvénye mindkettőnek.

Ismereteink szerint Bal'shin, Ryshkewitch, valamint Duckworth, Schiller, Millard, [Fagerlund (1973)], Šatava (1973), Danyushevsky és Djabarov (1973), Roy és Gouda (1975) állítottak fel még a szilárdság-porozitás kapcsolatára képletet.

A porozitásról előadottakat úgy foglalhatjuk össze, hogy **minden tényező, amely csökkenti a cementkő porozitását (képlékenyítő és tömítőszerke, gondos tömörítés) növeli annak a nyomószilárdságát.**

2.2.5.3. A cementkő és a vízzáróság, fagyállóság

[Balázs (2001)]

A cementkő vízzárósága nemcsak a vízzáró beton előfeltétele, hanem feltétele a beton fagyállóságának és vegyi hatásokkal szembeni ellenállásának is.

A cementkő vízzáróságát fokozza minden olyan módszer (képlékenyítők, tömítőszerek, jobb tömörítés), amellyel a víz–cement tényezőt 0,4 alá le tudjuk szorítani, mert ez esetben a hidráttermékek a kapilláris pórusokat idővel kitölthetik. Ennek azonban feltétele a cementkő (beton) nedvesen tartása.

A cementkő fagyállóságát a cement megválasztásával alig lehet befolyásolni. Mivel a víz megfagyása a kapilláris pórusok átmérőjének a függvénye (2.1. táblázat), a fagyállóság növelhető megfelelő pórusszerkezetű beton készítésével.

2.1. táblázat. A kapilláris pórusrendszer megnevezése Setzer (1987) szerint

Megnevezés	Átmérő	Víz fagyáspontja	Vízzáróság
mikropórusok	$\leq 10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nm}$	$-160 \text{ }^\circ\text{C}$	vízzáró
mezopórusok	$10^{-7} - 10^{-9} \text{ }\mu\text{m}$	$3-10 \text{ nm} - 43 \text{ }^\circ\text{C}$ $10-100 \text{ nm} - 15 \text{ }^\circ\text{C}$	
mikrokapillárisok	$< 10^{-6} \text{ }\mu\text{m} = 1 \text{ }\mu\text{m}$	$0 - -3 \text{ }^\circ\text{C}$	gyengén vízzáró
kapillárisok	$1 \text{ }\mu\text{m} - 30 \text{ }\mu\text{m}$		vízáteresztő
makrokapillárisok	$300 \text{ }\mu\text{m} - 1 \text{ mm}$		
durva pórusok	$> 1 \text{ mm}$		

A vízzáróbb cementkő ugyan fagyállóbb is, de biztos fagyállóságot csak 50–300 μm -es, légbuborékokat képző szerekkel bevitt légpórusokkal lehet elérni.

2.2.5.4. A cementkő zsugorodása, lassú alakváltozása

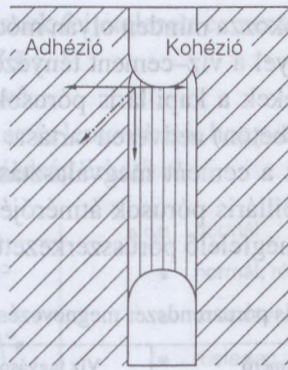
[Balázs (1984)]

A cementkőben a víz elhelyezkedése háromféle lehet:

- szerkezeti vagy kémiaailag kötött víz,
- felületi vagy rétegek között felvett, fizikailag kötött, ún. adszorpciós víz,
- kapillárisvíz.

A betonnak van kétféle olyan időben végbemenő alakváltozása, amelyek abban hasonlítanak egymáshoz, hogy a beton kapillárisaiban lévő, kémiaailag le nem kötött víz eltávozásával függenek össze és mégis lényegesen eltérnek egymástól.

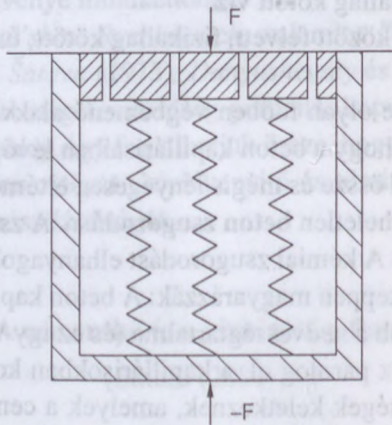
Az egyik jelenség a terheletlen **beton zsugorodása**. A zsugorodást kémiai és fizikai okokra vezetik vissza. A kémiai zsugorodást elhanyagolják, úgyhogy a zsugorodás jelenségét következőképpen magyarázzák: A beton kapillárisait víz tölti ki. Ha a környező levegőnek kisebb a nedvességtartalma (és ez így van, ha a beton nincs vízben), akkor a betonból víz párolog el, a kapillárisokban konkáv felület alakul ki, a víz felületén húzófeszültségek keletkeznek, amelyek a cementkőre, a betonra nyomást adnak át (2.8. ábra). A nyomás hatására a cementkő, a beton összenyomódik, zsugorodik. A zsugorodás mértéke függ a víz szilárdságától.



2.8. ábra. A kapilláris pórusban lévő víz a betonra nyomást fejt ki
[Balázs (1994)]

Ha az elkészített betont hagyjuk kiszáradni, akkor a váz gyenge, repedések keletkeznek. Ebben az esetben a zsugorodás jelentős része maradó. Ha viszont a betonváz szilárd a száradás kezdetén (pl. a betont 7 napig vízzel elárasztottuk), akkor a zsugorodás megfordítható, a beton nedvesítésével a zsugorodást kiegyenlítő duzzadás lép fel.

A **beton lassú alakváltozása** (kúszása) is a kapilláris pórusvíz feszültségállapotának a megváltozásával függ össze, de míg a zsugorodás esetén a beton száradásának a következménye, a lassú alakváltozás a tartós terhelésnek a pórusvízre gyakorolt hatásától függ. A következőképpen magyarázzák: A betonra jutó tartós terhelés bármely keresztmetszetben a betonvázra és a pórusvízre oszlik meg. Mivel a szűk kapillárisok a víz áramlásának ellenállnak, a víz a nyomás elől csak lassan tud kitérni. A pórusvízre ható nyomásnövekedés következtében a víz egy része el is párolog és ez újabb csökkenést jelent. A vízoszlop tehermentesülése következtében megnő a betonvázra ható nyomás, végül a terhelés teljes egészében a szilárd vázra támaszkodik, amelyik ennek a hatására alakváltozik.



2.9. ábra. A beton lassú alakváltozása folyamatának szemléltetése
[Balázs (1994)]

A beton lassú alakváltozását agyagtalajok konszolidációjához hasonlítják. Nézzük meg a 2.9. ábrát. Egy henger alakú, vizet tartalmazó edényben pontosan becsiszolt dugót helyezünk el, melyet rugók támasztanak alá. Terheljük meg F erővel a dugattyút, amelyben a kapillárisokat helyettesítő szűk nyílások vannak. A terhelés a víz és a rugók között oszlik meg. A rugók a betont, a víz pórusvizet helyettesíti. A terhelés hatására a dugattyún lévő pórusokon a víz átáramlik, a dugattyú lassan süllyed, a terhelést egyre inkább a rugók veszik fel, miközben összenyomódnak.

A cementkő zsugorodására a 2.10. ábrán mutatunk be példát. A zsugorodási függvény kifejezhető

$$\varepsilon_{c, sh}(t) = \varepsilon_{c, sh}(\infty)(1 - e^{-\alpha t})$$

exponenciális függvénnyel.

A képletben

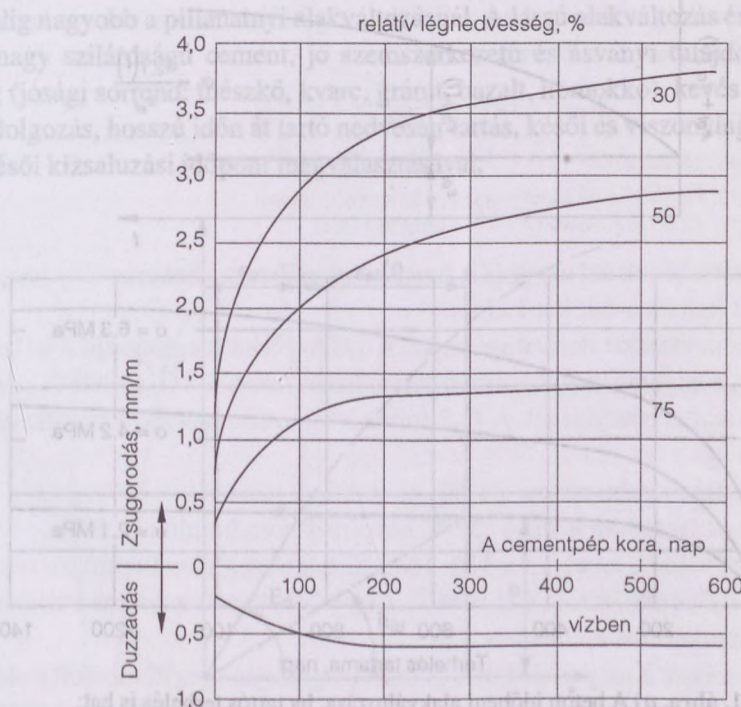
$\varepsilon_{c, sh}(t)$ a zsugorodás t időpontban, %;

t a vizsgálat tartama 24 órás kortól (nap vagy év);

$\varepsilon_{c, sh}(\infty)$ a zsugorodás végértéke, %;

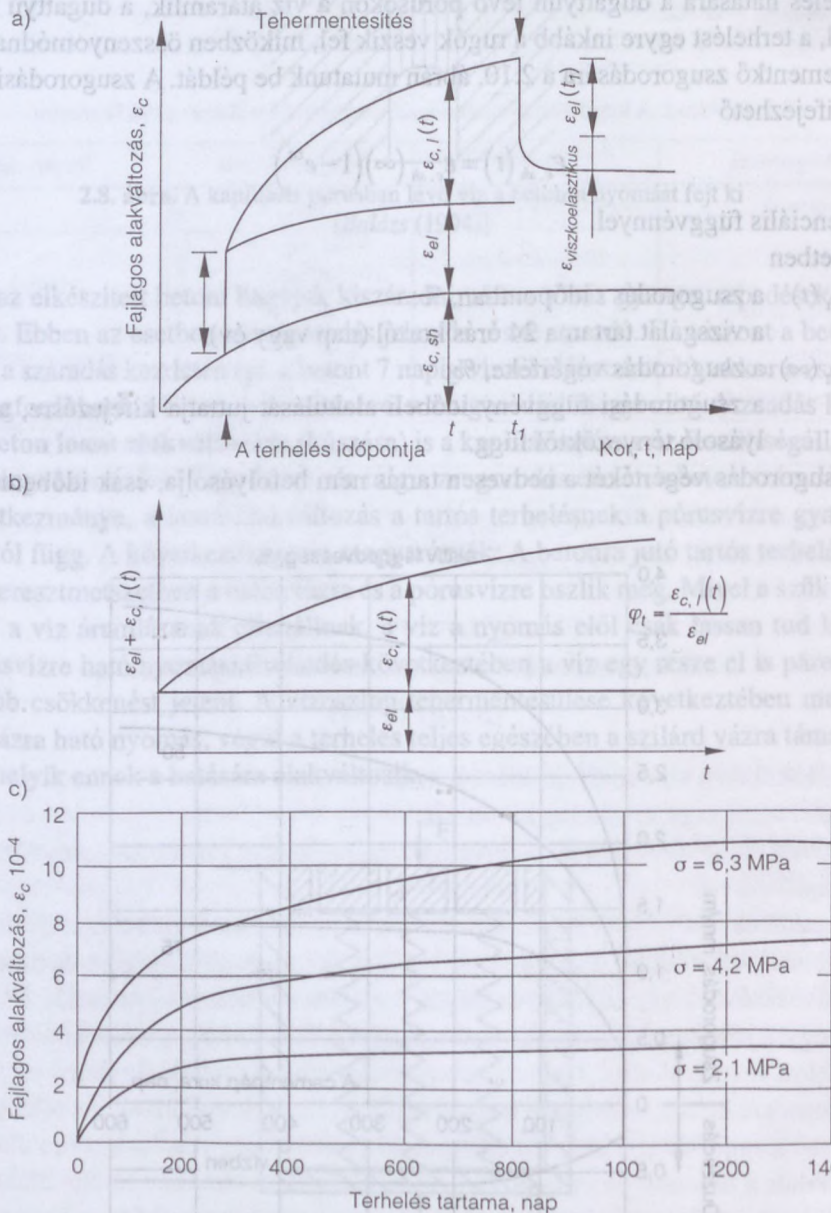
α a zsugorodási függvény időbeli alakulását juttatja kifejezésre, a befolyásoló tényezőktől függ.

A zsugorodás végértékét a nedvesen tartás nem befolyásolja, csak időbeni kialakulását.



2.10. ábra. A cementkő zsugorodása és duzzadása a tárolótér nedvességtartalma függvényében [Balázs (1987)]

A lassú alakváltozás is időben lejátszódó folyamat, amelyet a 2.11. ábra szemléltet. A vizsgált betonhasáb zsugorodni kezd. Adott időpontban megterheljük, ϵ_{el} rugalmas alakváltozás keletkezik. Majd megkezdődik az időben végbemenő lassú alakváltozás. Ha t_1 időpontban tehermentesítünk, akkor fellép a rugalmas alakváltozás, majd időben végbemenő rugalmas-viszkózus alakváltozás követi.



2.11. ábra. a) A beton időbeni alakváltozása, ha tartós terhelés is hat; b) a kúszási tényező értelmezése [Balázs (1984)]; c) a lineáris kúszás törvényének értelmezése Glanville és Davis kísérletei szerint

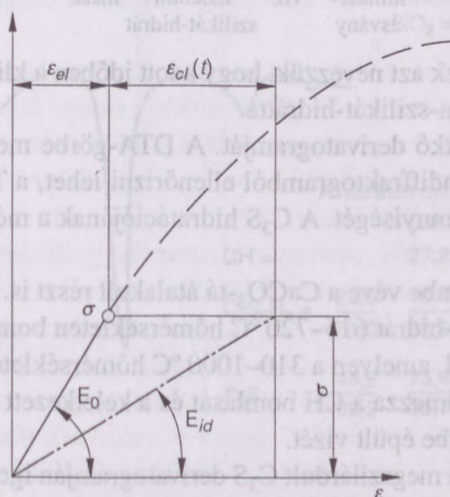
Möller és Brzesky (1937) könyve szerint már akkor tudták, hogy a lassú alakváltozás nem maradandó, mint a képlékeny alakváltozás, hanem nagy része megszűnik a tehermentesítés után. De csak később nevezték emiatt a betont *rugalmas–viszkózus anyagnak*.

A beton kúszását úgy vesszük számításba, hogy a tényleges kezdeti rugalmassági modulus helyett az **ideális rugalmassági modulussal számolunk**, melyet a 2.12. ábra szerint vezetünk le. Terheljük meg a betonhasábot σ tartós feszültséggel. Ha ezt a terhelést t időtartamig rajta hagyjuk, akkor az alakváltozást a σ – ε görbén vízszintes vonal jelzi. Ha a tartós feszültség a hasábszilárdság harmadát nem lépi túl, akkor a σ – ε görbe első szakasza egyenes. Az ideális rugalmassági modulus a következőképpen számíthatjuk (t időpontban):

$$E_{id} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{el} + \varepsilon_{c, \ell}(t)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{el}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_{c, \ell}(t)}{\varepsilon_{el}}} = \frac{E_0}{1 + \varphi(t)},$$

ahol $\varphi(t) = \frac{\varepsilon_{c, \ell}(t)}{\varepsilon_{el}}$ a *lassú alakváltozási vagy kúszási tényező*. Értéke 1–3.

Mivel φ képletében a nevezőben szerepel a terhelés időpontjában lévő ε_{el} , az a kedvező, ha a betont minél később terhelik tartós teherrel. Víz alatti tárolás esetén értéke alig nagyobb a pillanatnyi alakváltozásnál. A lassú alakváltozás értéke csökkenthető nagy szilárdságú cement, jó szemszerkezetű és ásványi tulajdonságú adalékanyag (jósági sorrend: mészkő, kvarc, gránit, bazalt, homokkő), kevés vízmennyiség, jó bedolgozás, hosszú időn át tartó nedvesen tartás, késői és viszonylag kis megterhelés, késői kizsaluzási időpont megválasztásával.



2.12. ábra. Az ideális rugalmassági modulus levezetése
[Balázs (1984)]

Mindebből következik, hogy kedvező, ha minél később kapja meg a szerkezet a tartós terhelést. Ez ellen hatnak egyes technológiák, pl. a szabadbetonozású hídépítés, amelynél a heti haladási ciklust csak akkor tudják tartani, ha 2–3 napos korban megfeszítik a betont.

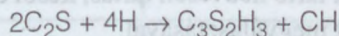
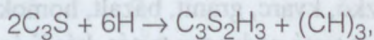
Fentiekben ismertetett kúszási mechanizmus szerint nagy hatása van a *környező levegő páratartalmának*. Száraz éghajlatú helyeken sokkal nagyobb lassú alakváltozások következnek be, mint páradús völgyekben, folyók mellett. Egyébként a lassú alakváltozás végértéke nem függ a pórusvíz eltávozásának a sebességétől.

Hatása van a lassú alakváltozásra a *vasbeton szerkezet vastagságának* is, mert a víz a vastag szerkezet (pl. völgyzárógát) belsejéből lassabban távozik el (vagy sohasem), szemben a vékony előre gyártott elemmel, ezért kúszása is kisebb.

Glanville és Davis [Möller–Brzesky (1937)] idevágó kutatásainak igen fontos eredménye, hogy lassú alakváltozásra is érvényes a Hooke-törvény, azaz kétszer akkora tartós terheléshez kétszer akkora lassú alakváltozás tartozik (2.11c. ábra). Ezt nevezük a **lineáris kúszás törvényének**, amit a hasábszilárdság 30–40%-át kitevő tartós teherre tartanak érvényesnek.

2.2.6. A hidratáció mértéke

A cementkő szilárdságát lényegében a C_3S és a C_2S klinkerásványokból keletkező hidrátok adják. Tehát a 2.2.1. fejezet szerint



klinker- víz kalcium- mész
ásvány szilikát-hidrát

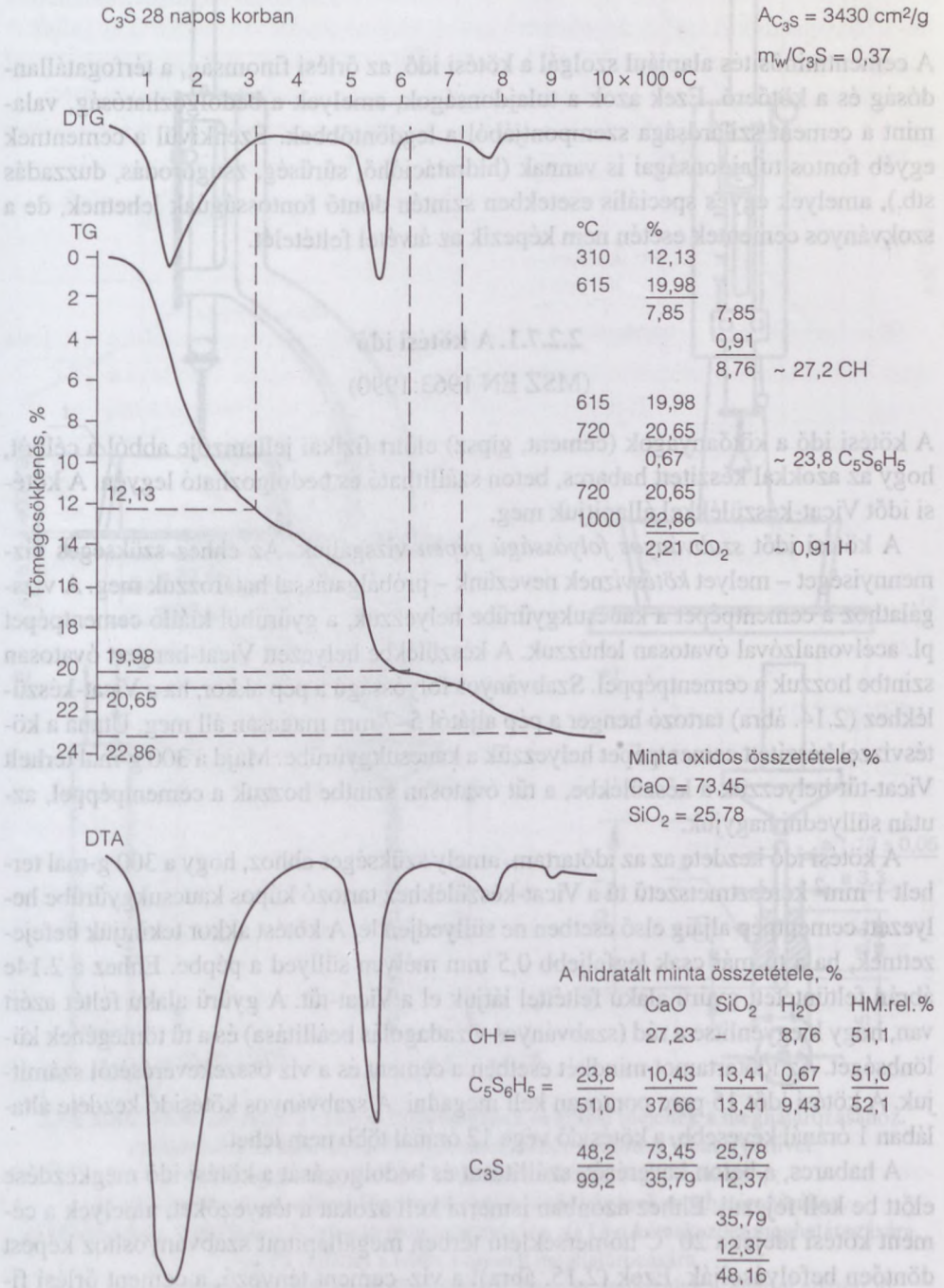
Hidratáció mértékének azt nevezzük, hogy adott időben a klinkerásvány hány százaléka alakult át kalcium-szilikát-hidrattá.

Elkészítjük a cementkő derivatogramját. A DTA-görbe megmutatja a keletkező hidrátokat, amit röntgendiffraktogramból ellenőrizni lehet, a TG-görbéből pedig ki lehet számítani azok mennyiségét. A C_3S hidratációjának a mértékét következőkből határozhatjuk meg:

- A CH-ből, figyelembe véve a $CaCO_3$ -tá átalakult részt is.
- A kalcium-szilikát-hidrát 615–720 °C hőmérsékleten bomló részéből.
- A szerkezeti vízből, amelyen a 310–1000 °C hőmérsékleten bomló összes vizet értjük, amely tartalmazza a CH bomlását és a keletkezett kalcium-szilikát-hidrát 1 mol szerkezetbe épült vizét.

Míg a CH bomlását a megszilárdult C_3S derivatogramján igen határozott csúcs jellemzi, addig a C_2S derivatogramján ez rendszerint nincs, mivel a belőle keletkezett CH mikrokristályos, úgyhogy derivatográffal nem mutatható ki.

A derivatogramokra és értékelésükre példát *Balázs* (2001) szemléltet. Példaként C_3S -jának az értékelését mutatjuk be (2.13. ábra).



2.13. ábra. C₃S-pépek derivatogramjainak az értékelése

2.2.7. A cementminősítés alapjául szolgáló tulajdonságok és vizsgálatok

A cementminősítés alapjául szolgál a kötési idő, az őrlési finomság, a térfogatállandóság és a kötőerő. Ezek azok a tulajdonságok, amelyek a bedolgozhatóság, valamint a cement szilárdsága szempontjából a legdöntőbbek. Ezenkívül a cementnek egyéb fontos tulajdonságai is vannak (hidratációhő, sűrűség, zsugorodás, duzzadás stb.), amelyek egyes speciális esetekben szintén döntő fontosságúak lehetnek, de a szokványos cementek esetén nem képezik az átvétel feltételét.

2.2.7.1. A kötési idő

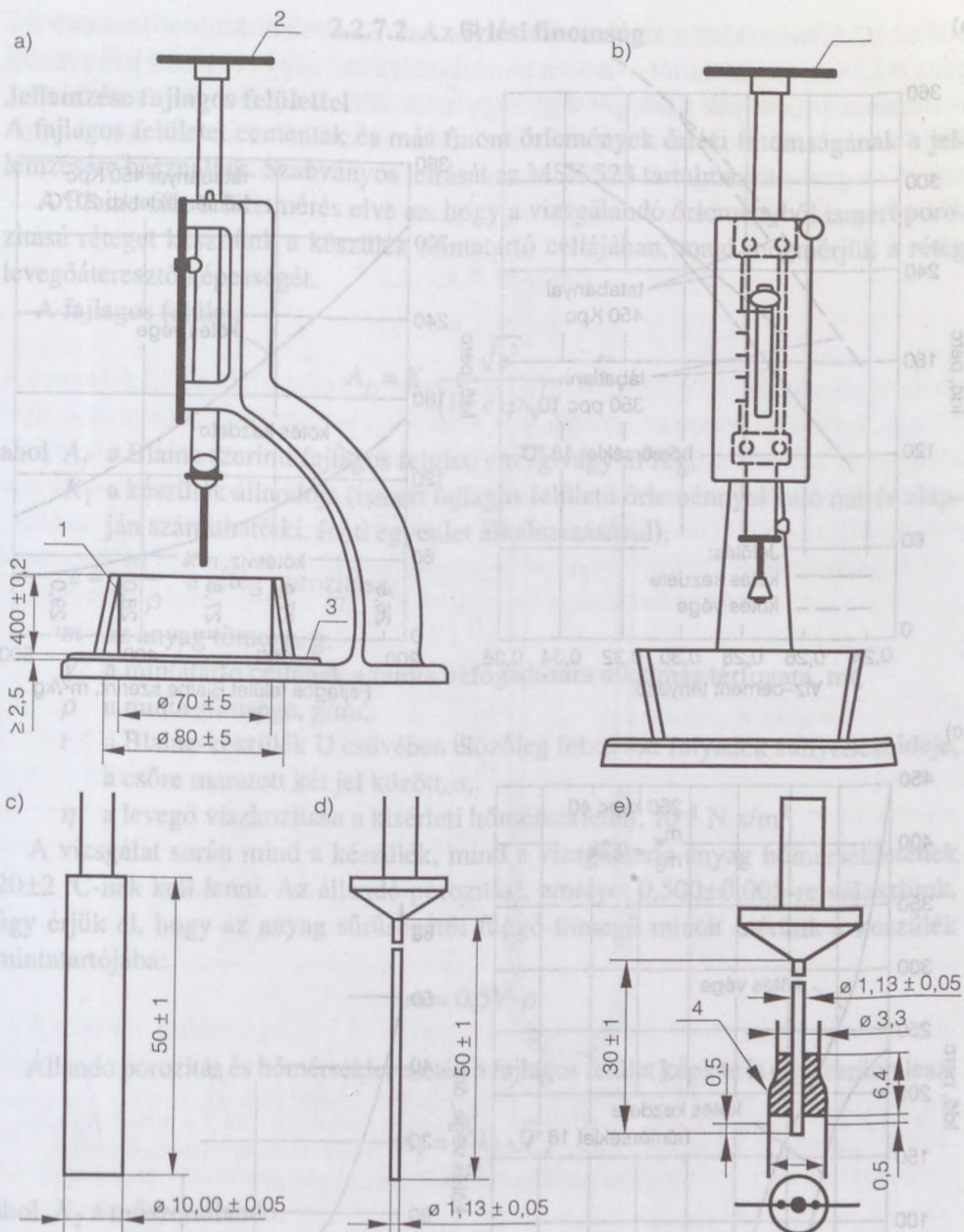
(MSZ EN 1963:1990)

A kötési idő a kötőanyagok (cement, gipsz) előírt fizikai jellemzője abból a célból, hogy az azokkal készített habarcs, beton szállítható és bedolgozható legyen. A kötési időt Vicat-készülékkel állapítjuk meg.

A kötési időt *szabványos folyósságú pépen* vizsgáljuk. Az ehhez szükséges vízmennyiséget – melyet *kötésvíznek* nevezünk – próbálgatással határozzuk meg. A vizsgálatához a cementpépet a kaucsukgyűrűbe helyezük, a gyűrűből kiálló cementpépet pl. acélvonalzóval óvatosan lehúzzuk. A készülékbe helyezett Vicat-hengert óvatosan szintbe hozzuk a cementpéppel. Szabványos folyósságú a pép akkor, ha a Vicat-készülékhez (2.14. ábra) tartozó henger a pép aljától 5–7 mm magasan áll meg. Utána a kötésvízzel készített cementpépet helyezük a kaucsukgyűrűbe. Majd a 300 g-mal terhelt Vicat-tűt helyezük a készülékbe, a tűt óvatosan szintbe hozzuk a cementpéppel, azután süllyedni hagyjuk.

A kötési idő kezdete az az időtartam, amely szükséges ahhoz, hogy a 300 g-mal terhelt 1 mm² keresztmetszetű tű a Vicat-készülékhez tartozó kúpos kaucsukgyűrűbe helyezett cementpép aljáig első esetben ne süllyedjen le. A kötést akkor tekintjük befejezettnek, ha a tű már csak legfeljebb 0,5 mm mélyen süllyed a pépbe. Ehhez a 2.14e ábrán feltüntetett gyűrű alakú feltételt látjuk el a Vicat-tűt. A gyűrű alakú feltételt azért van, hogy kiegyenlítse a rúd (szabványos vízadagolás beállítása) és a tű tömegének különbségét. Az időtartamot mindkét esetben a cement és a víz összekeverésétől számítjuk. A kötési időt 15 perc pontosan kell megadni. A szabványos kötésidő kezdete általában 1 óránál kevesebb, a kötésidő vége 12 óránál több nem lehet.

A habarcs, a beton keverését, szállítását és bedolgozását a kötési idő megkezdése előtt be kell fejezni. Ehhez azonban ismerni kell azokat a tényezőket, amelyek a cement kötési idejét a 20 °C hőmérsékletű térben megállapított szabványoshoz képest döntően befolyásolják. Ezek (2.15. ábra): a víz–cement tényező, a cement őrlési finomsága, a kötésszabályozó vegyszerek és a hőmérséklet.



2.14. ábra. Vicat-készülék a cement folyósságának és kötési idejének a meghatározásához.

a) Oldalnézet a kötészekedzet meghatározásához beállított Vicat-gyűrűvel.

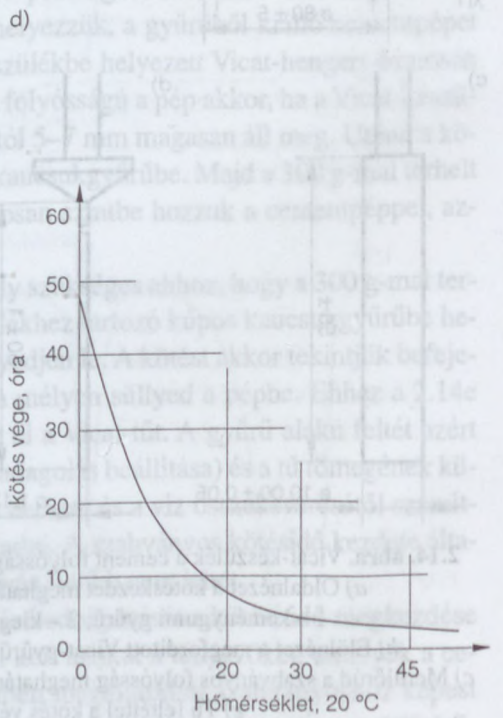
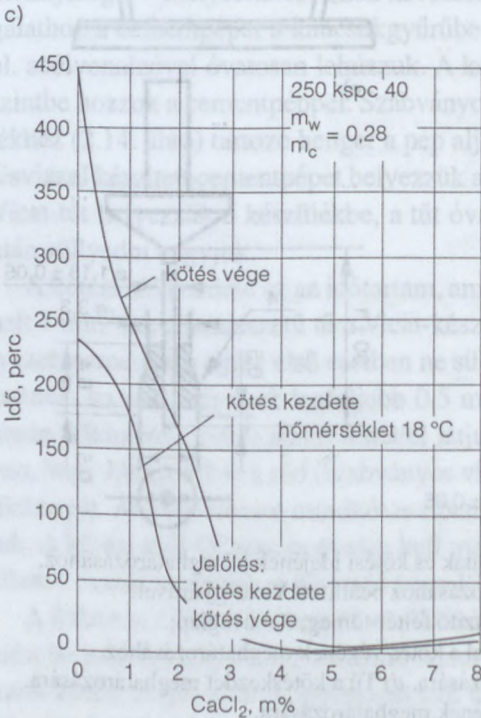
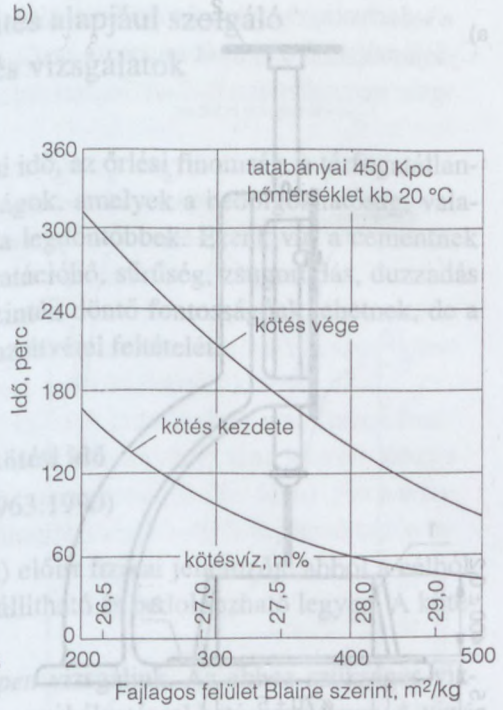
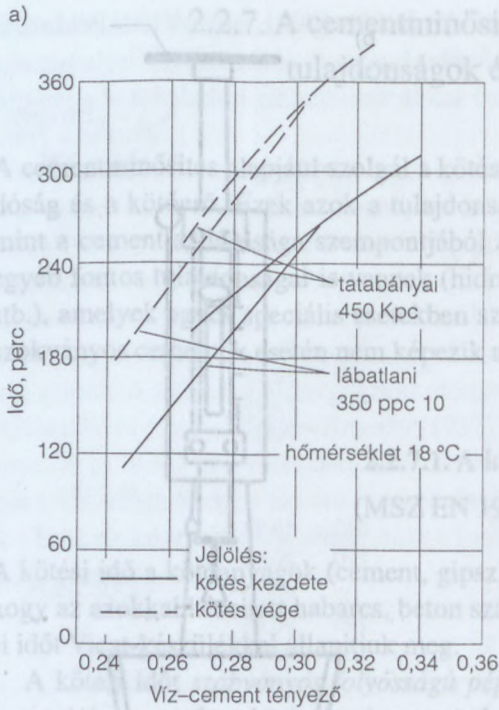
1 – keménygumi gyűrű; 2 – kiegészítő feltét-tömeg; 3 – üveglap;

b) Előlnézet a megfordított Vicat-gyűrűvel a kötés végének meghatározásához.

c) Merülőrúd a szabványos folyósság meghatározására. d) Tű a kötészekedzet meghatározására.

e) Tű feltéttel a kötés végének meghatározására.

4 – Légrés : a kötés végének meghatározásához használt, gyűrű alakú feltéttel ellátott tű kinagyított részlete. [MSZ EN 196-3:1990]. Méretek mm-ben



2.15. ábra. A cement kötéseidjét befolyásoló tényezők
a) víz-cement tényező; b) fajlagos felület; c) CaCl₂; d) hőmérséklet

2.2.7.2. Az őrlési finomság

Jellemzése fajlagos felülettel

A fajlagos felületet cementek és más finom őrlemények őrlési finomságának a jellemzésére használjuk. Szabványos leírását az MSZ 523 tartalmazza.

A Blaine-féle felületmérés elve az, hogy a vizsgálandó őrleményből ismert porozitású réteget készítünk a készülék mintatartó cellájában, majd megmérjük a réteg levegőáteresztő képességét.

A fajlagos felület:

$$A_f = K_1 \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)\rho\sqrt{\eta}} \cdot \sqrt{t},$$

ahol A_f a Blaine szerinti fajlagos felület, cm^2/g vagy m^2/kg ,

K_1 a készülék állandója (ismert fajlagos felületű őrleményvel való mérés alapján számítható ki, fenti egyenlet alkalmazásával),

$e = \frac{m}{V \cdot \rho}$ a réteg porozitása,

m az anyag tömege, g,

V a mintatartó cellának a minta befogadására alkalmas térfogata, m^3 ,

ρ a minta sűrűsége, g/m^3 ,

t a Blaine-készülék U csövében előzőleg felszívott folyadék süllyedési ideje, a csőre maratott két jel között, s,

η a levegő viszkozitása a kísérleti hőmérsékleten, $10^{-1} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$.

A vizsgálat során mind a készülék, mind a vizsgálandó anyag hőmérsékletének $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ -nak kell lenni. Az állandó porozitást, amelyet $0,500 \pm 0,005$ -re választunk, úgy érjük el, hogy az anyag sűrűségétől függő tömegű mintát mérünk a készülék mintatartójába:

$$m = 0,5V \cdot \rho.$$

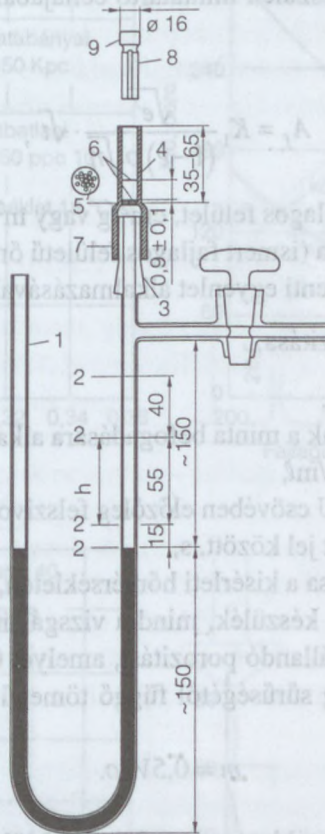
Állandó porozitás és hőmérséklet esetén a fajlagos felület képlete is egyszerűbb lesz:

$$A_f = \frac{K_2}{\rho} \cdot \sqrt{t},$$

ahol K_2 a műszerállandó.

A készülék U alakú üvegcső (2.16. ábra), amelynek egyik szára légmentesen kapcsolódik a mintatartó cellához, a másik szára nyitott. A mintatartó cellához kapcsolódó csőszáron négy bekarcolt jel van. A csövet az alsó jelig nem illó, nem higroszkópos folyadékkal (pl. paraffinolaj, dibutil-ftalát) fel kell tölteni. Majd az m tömegű mintaanyagot el kell helyezni a mintatartóban. A minta alatt a perforált lemezen és felette is szűrőpapír korongot kell elhelyezni. A minta térfogatát úgy biztosítjuk, hogy a tömörítő dugattyút a mintatartó felső szárával ütköztetjük. A mintatartóba

105±2 °C hőmérsékleten kiszárított anyagot kell elhelyezni. Majd a tömörítő dugattyút kivéve a mintatartót óvatosan ráhelyezzük a cső négy bekarcolt jelű szárára. A minta alól kiszívjuk a levegőt úgy, hogy a folyadék a legfelső jelig emelkedjék. Majd a csap elzárása után a folyadékszint süllyedni kezd. Azt a t időt kell stopperórával megmérni, amíg a folyadékszint a második jeltől a harmadik jelig süllyed. A mérés pontossága tizedmásodperc nagyságrendű.



2.16. ábra. Blaine-készülék, méretek mm-ben

- Jelölés: 1 – U-alakú üvegcső, 2 – szintjelek, 3 – csiszolt csatlakozó rész, 4 – mintatartó cella,
5 – perforált lemez, 6 – szűrőpapír korongok, 7 – U csőhöz csatlakozó csiszolt felület,
8 – tömörítő dugattyú, 9 – felfekvő perem

A mérés előtt kell meghatározni ismert fajlagos felületű örleménnyel a műszerállandót a fenti képlettel.

A cementmintát a véletlen mintavétel elve alapján kell venni és vizsgálat előtt ki kell szárítani.

A cement fajlagos felületét m^2/kg -ban vagy cm^2/g -ban adjuk meg. Szabványok követelményként határértéket írnak elő. Cementjeink fajlagos felülete általában 300–350 m^2/kg között változik.

Jellemzés szitamarádékmal

Egyszerűbb a fajlagos felület mérésénél.

A véletlen mintavétellel vett, kiszáritott mintát átszítaljuk a 90 µm lyukbőségű szitán. A fennmaradt résszel jellemezzük (a bemért anyaghoz viszonyított százalékban) a cement őrlési finomságát.

2.2.7.3. A kötőerő

(MSZ EN 196-1:1992)

A cementek kötőerejét képlékeny habarcsból készített 40 × 40 × 160 mm-es hasábok hajlító- és nyomószilárdságával jellemezzük. A habarcsához három frakcióból, egyenlő arányban összekevert szabványos minőségű homokot kell használni. A cement: víz: szabványos homok (2.2. táblázat) = 1:0,5:3. A habarcsot szabványos lapátos keverőben, előírt módon kell megkeverni, és belőle 4 × 4 × 16 cm méretű hasábokat kell készíteni (2.17. ábra). A hasábokat 24 óráig 90% relatív légnedvesség-tartalmú térben, azt követően kb. 20 °C hőmérsékletű vízben kell tárolni.

2.2. táblázat. A szabványos homok szemmegoszlása

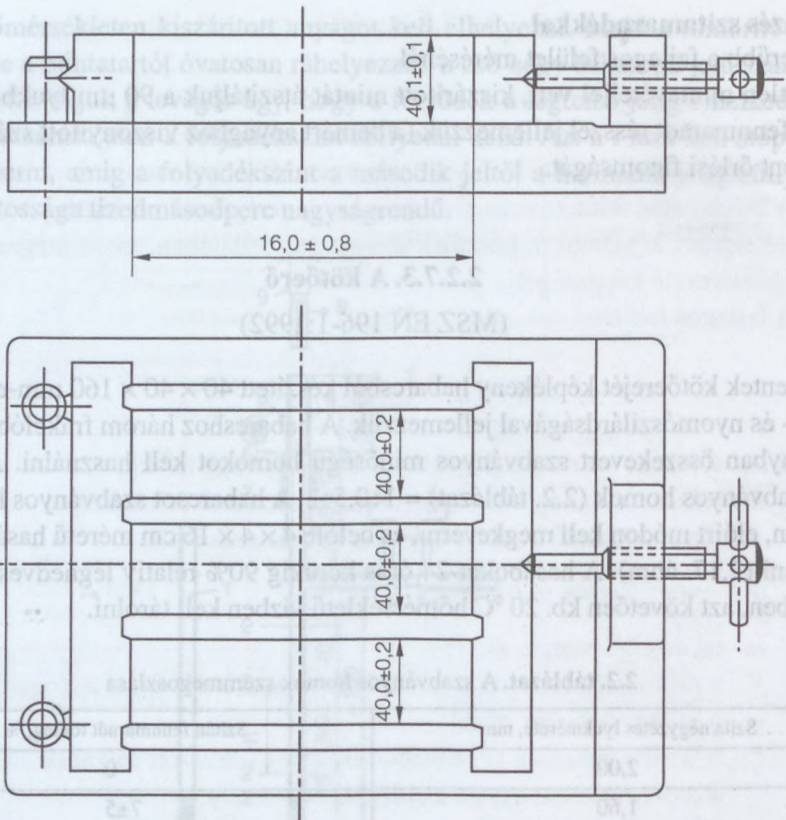
Szita négyzetes lyukmérete, mm	Szítán fennmaradt tömeg, %
2,00	0
1,60	7±5
1,00	33±5
0,50	67±5
0,16	87±5
0,08	99±1

A hasábok szilárdságát 3, 7 és 28 napos korban (450R jelű cementét 1 napos korban is) 3–3 hasábon kell meghatározni. Először hajlítóvizsgálattal a hajlító-húzószilárdságot határozzák meg, majd a próbatestek hajlítás során eltört darabjain a nyomószilárdságot (2.18. ábra). A jellemző érték a 3, ill. 6 vizsgálati eredmény átlaga. Ha valamelyik szilárdság az átlagtól 10%-nál jobban eltér, akkor azt az átlagszámításból ki kell hagyni.

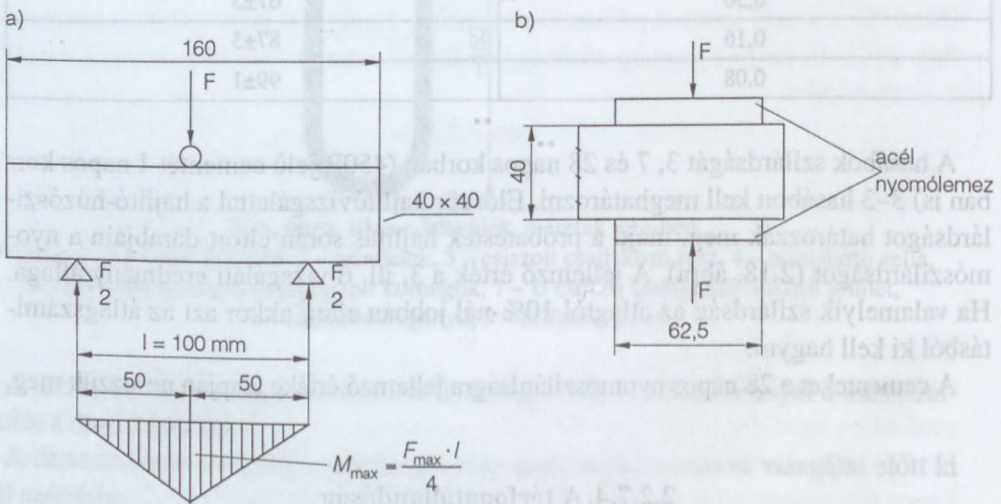
A cementeket a 28 napos nyomószilárdságra jellemző értéke alapján nevezzük meg.

2.2.7.4. A térfogatállandóság

A cement térfogatállandóságát (az MSZ 523-5:1975 szerint) vízpróbával és főzőpróbával kell ellenőrizni. A vizsgálatához üveglemezre 4 db 8–10 cm átmérőjű, kör alakú



2.17. ábra. A cement szilárdsági vizglatára használt sablon (mértékek mm-ben)



$$f_{ct, \kappa} = \frac{M_{\max}}{K} = \frac{M_{\max} \cdot 10}{4} \cdot \frac{6}{4^3} = 0,234 \cdot F_{\max}$$

$$f_{cb} = \frac{F_{\max}}{A} = \frac{F_{\max}}{2500 \text{ mm}^2}$$

2.18. ábra. A cement szilárdságának a vizsgálata

lepényt kell készíteni a 2.2.7.1. szerinti szabványos folyósságú pépből és 24 órán át legalább 90% relatív légnedvesség-tartalmú térben tárolni. A **vízpróba** során közülük két lepényt további 27 napon át vízben kell tárolni. A **főzőpróba**hoz használt másik két lepényt pedig vízbe kell helyezni és a víz felforralása után 3–4 órán át 100 °C hőmérsékleten tartani, majd lehűlni hagyni. Akkor tekinthető a cement térfogatállandónak, ha a vízpróba végén sem repedés, sem vetemedés, a főzőpróba végén repedés vagy egyéb elváltozás nem észlelhető. Az építőiparban használt cementeknek térfogatállandóknak kell lenniük.

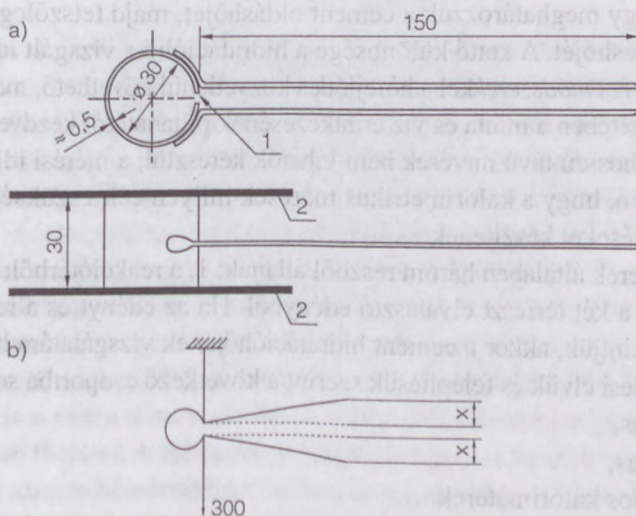
A cement térfogatállandóság hiányát duzzadó vagy zsugorodó repedések jelzik. A duzzadó lepények repedései mozaikszerűek, míg a zsugorodóké pedig sugárirányúak.

Az MSZ EN 196-3:1990 a térfogatállandóság vizsgálatára a **Le-Chatelier-gyűrűs módszert** írja elő (2.19a ábra).

A vizsgálat menete

A vékonyan beolajozott gyűrűt kézi erővel megtöltjük szabványos folyósságú (2.2.7.1. fejezet) cementpéppel, rázás nélkül, megakadályozva a gyűrű szétnyílását. Lesimítjuk, olajozott üveglappal lefedjük és $24 \pm 0,5$ órán át $20 \pm 1^\circ\text{C}$ hőmérsékletű, legalább 98% rel. légnedvességű térben tároljuk. Ekkor megmérjük a tűhegyek közötti távolságot. Ezt követően a gyűrűt vízfürdőben 30 ± 5 percen belül forrási hőmérsékletre melegítjük. Majd 3 órán át forrási hőmérsékleten tároljuk. Ekkor újra megmérjük a tűhegyek közötti távolságot 0,5 mm pontossággal. Ezt követően lehűtjük a gyűrűt $20 \pm 1^\circ\text{C}$ hőmérsékletre és újra lemérjük a tűhegyek távolságát. A mérési eredmény a tűhegyek harmadik és első mérése közti különbség (2.19b ábra). Mértékadó két próbatest mérési eredményének az átlaga.

A vizsgálattal a szabad CaO és szabad MgO duzzadást okozó hatását mutatjuk ki.



2.19. ábra. Le-Chatelier-gyűrű a cementek térfogatállandóságának meghatározására
a) Le-Chatelier-gyűrű kiindulási helyzetben; 1 – rés; 2 – üveglap. b) a vizsgálat vége

2.2.8. A hidratációhő

2.2.8.1. A hidratációhőről általában

Cementek esetében a víz hatására végbemenő reakciót összefoglalóan hidratáció-nak, a hidratáció során felszabaduló, tömegegységre vonatkoztatott reakcióhőt pedig *hidratációhőnek* nevezzük.

A hidratációhő hatására a beton felmelegszik. Ez lehet hasznos (pl. téli betonozás esetén), de lehet káros (pl. az egyenlőtlen lehűlés miatt a betonban hőmérsékleti feszültségek, repedések keletkezhetnek). A hidratációhőnek emiatt nagy jelentőséget tulajdonítottunk.

A *cement hidratációhője* c. tanulmányban [Balázs–Boros Jné–Zimonyi (1973)] összefoglaltuk a hidratációhőre vonatkozó, kb. 20 éves múltra visszatekintő irodalmi ismereteket. Ezek:

- A hidratációhő mérési módszerei.
- A klinkerásványok hidratációhője.
- A cement hidratációhője és a befolyásolási tényezők.
- A hidratációhő számítása a klinker oxidos és ásványi összetételéből.
- A szilárduló beton hőmérsékletének a számítására javasolt képletek.

2.2.8.2. A vizsgálati módszerek

[Balázs–Boros Jné–Zimonyi (1973), Balázs (1987)]

A *statikus módszer* oldáshőmérésen alapul, a hőfejlődés közvetlenül nem mérhető. Lényege az, hogy meghatározzuk a cement oldáshőjét, majd tetszőleges időpontban a cementkő oldáshőjét. A kettő különbsége a hidratációhő a vizsgált időpontban.

A *kaloriméteres módszerekkel* a hőfejlődés közvetlenül követhető, mégpedig pépek, ill. habarcsok esetében a minta és víz érintkezésének pillanatától kezdve. E módszerek hátránya, hogy hosszú távú mérések nem vihetők keresztül, a mérési idő max. 10 nap.

Attól függően, hogy a kalorimetrikus mérések milyen célra szükségesek, nagyon eltérő berendezéseket készítenek.

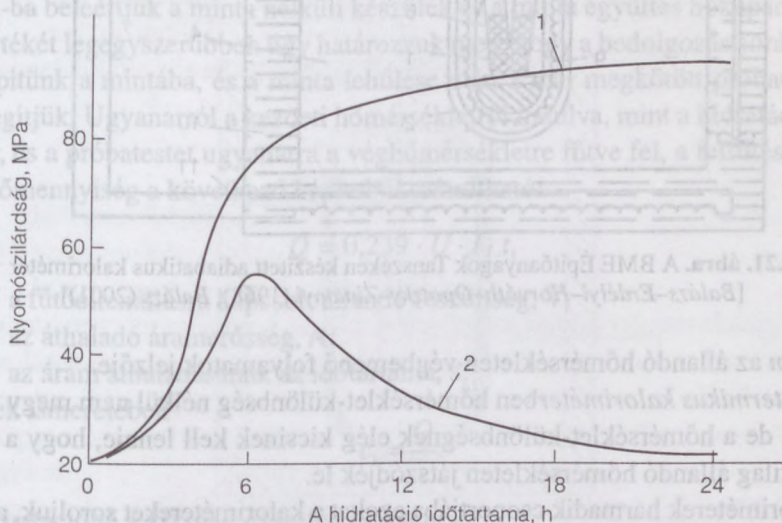
A kaloriméterek általában három részből állanak: 1. a reakcióteréből; 2. a külső környezetből és 3. a két térrészt elválasztó edényből. Ha az edényt és a reakcióteret egy rendszernek tekintjük, akkor a cement hidratációhőjének vizsgálatára használt kaloriméterek működési elvük és felépítésük szerint a következő csoportba sorolhatók:

- adiabatikus,
- izotermikus,
- hőáramlásos kaloriméterek.

Adiabatikus az olyan *kaloriméter*, amelynél a reakcióter és a környezet között hőcsere nem megy végbe. Ezt az esetet közelítjük meg úgy, hogy a környezetet mindig

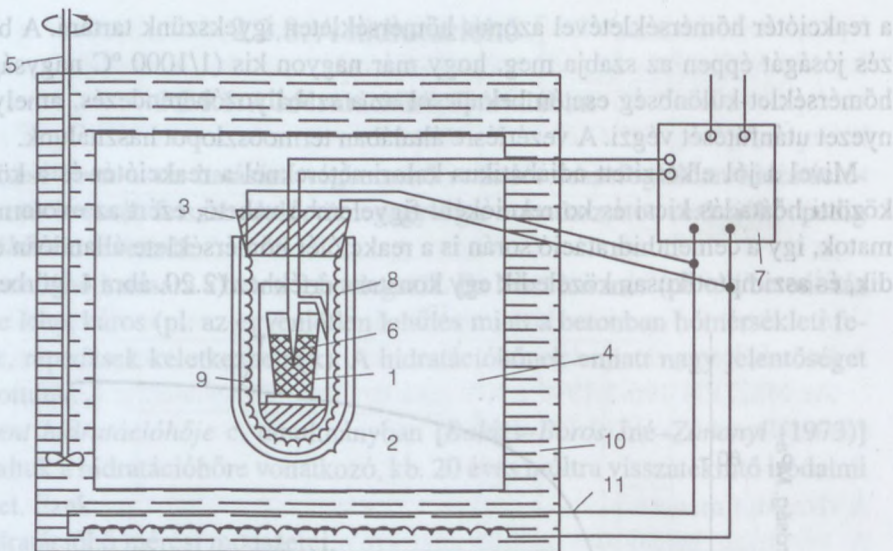
a reakciótér hőmérsékletével azonos hőmérsékleten igyekszünk tartani. A berendezés jóságát éppen az szabja meg, hogy már nagyon kis ($1/1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ nagyságrendű) hőmérséklet-különbség esetén bekapcsol az a szabályozóberendezés, amely a környezet utánfűtését végzi. A vezérlésre általában termooszlopot használunk.

Mivel a jól elkészített adiabatikus kalorimétereknél a reakciótér és a környezet közötti hőátadás kicsi és korrekcióként figyelembe vehető, ezért az exoterm folyamatok, így a cementhidratáció során is a reakciótér hőmérséklete állandóan emelkedik, és aszimptotikusan közeledik egy konstans értékhez (2.20. ábra 1. görbe).



2.20. ábra. Hőmérséklet-emelkedés. 1 – adiabatikus; 2 – hőáramlásos vagy szemiadiabatikus kaloriméterben [Balázs (1987, 2001)]

A 2.21. ábrán az Építőanyagok Tanszéken használt, Zimonyi Gyula docens által készített adiabatikus berendezés látható. A mintát (1) műanyag edénybe, ezt egy rézedénybe (9) helyeztük, amelyet termoszba (2) tettünk. A termoszt parafadugóval (3) zártuk le. A termoszt egy termosztátba (4) helyeztük, amelynek a hőmérsékletét vízköpennyel szabályoztuk. A vízköpeny (10) hőmérsékletét keverőberendezés (5) tartotta azonos értéken. A termosztban a minta hőmérsékletét termoelemmel (6) mértük. A műanyagból készített edénybe tett minta közepében helyeztük el a termoelem egyik forrasztási helyét, míg a másik forrasztási hely a mintát körülvevő fémedény falával érintkezett. Ha a vizsgált minta hőmérséklete a hidratációhő hatására nőtt, akkor a vezérlőberendezés (7) zárta a fűtő áramkört (8), és a fémedényt mindaddig melegítette, amíg el nem érte a minta hőmérsékletét. A termosztát fűtése (11) párhuzamosan volt kapcsolva a belső fűtéssel. A fűtőtestek ellenállását úgy választottuk meg, hogy a belső és a külső fűtés azonos hőmérséklet-emelkedést hozzon létre. A nagyobb hőmérsékleten bekövetkező hővesztéséget a termosztát pótfűtésével egyenlítettük ki. A fűtés bekapcsolt, ha a hőmérséklet-különbség $0,007\text{ }^{\circ}\text{C}$ volt.



2.21. ábra. A BME Építőanyagok Tanszéken készített adiabatikus kaloriméter
[Balázs–Erdélyi–Horváth–Opatzky–Zimonyi (1968), Balázs (2001)]

Izoterm az állandó hőmérsékleten végbemenő folyamatok jelzője.

Az *izotermikus kaloriméterben* hőmérséklet-különbség nélkül nem megy végbe a hőleadás, de a hőmérséklet-különbségnek elég kicsinek kell lennie, hogy a reakció gyakorlatilag állandó hőmérsékleten játszódjék le.

A kaloriméterek harmadik csoportjába azokat a kalorimétereket soroljuk, amelyek sem az izotermikus, sem az adiabatikus feltételeknek nem tesznek eleget. Ezeknél a kalorimétereknél a reakciótér felmelegszik, miközben az állandó hőmérsékletű környezetnek hőt ad le. A reakciótér hőmérséklet-változásából és a leadott hőmennyiség figyelembevételéből (a hőkapacitás ismeretében) fejlődött összes hőmennyiség (hidratációhő) kiszámítható. A mérés tartamán a reakciótérben levő anyag hőmérséklete mindaddig emelkedik, amíg a hőfejlődés sebessége egyenlő nem lesz a leadott hőárammal. Ekkor a hőmérsékleti görbe eléri a maximumát, majd csökkenni kezd, mert azonos idő alatt kevesebb hő fejlődik, mint amit a kaloriméter a környezetének lead (2.20. ábra 2. görbe). Ezeket hőáramlásos, ill. *semiadiabatikus kalorimétereknek* nevezzük.

A beton kezdeti szilárdulását a hidratáció kezdeti szakaszán keletkezett hő segíti elő, amit oldáshőmérséssel nem tudunk meghatározni. A kalorimetrikus módszerek közül azt a kettőt ismertetjük, amelyekkel a beton tényleges felmelegedése a legjobban jellemezhető. Ugyanis ezekkel kísérleteztünk.

Az adiabatikus kaloriméterbe mindig közel olyan cement : homok : víz arányt kell választani, mint a beton összetételében a cement : adalékanyag : víz arány. A konzisztenciát is hasonlóra célszerű választani. Ha tiszta cementpépet vizsgálnánk, akkor a hőmérséklet annyira megnőne, hogy a cement szokványos hidratációját megzavarná.

Ha ismerjük a minta m_m tömegét, és megmérjük az adiabatikus kaloriméterben a hőmérséklet-emelkedést (ΔT), akkor abból a fejlődött hőmennyiséget a következő képletből számíthatjuk:

$$Q = c_k \cdot \Delta T,$$

ahol Q a fejlődött hőmennyiség, J;

c_k a kaloriméter hőkapacitása, J/°C;

ΔT a hőmérséklet-emelkedés a kaloriméterben, °C.

A c_k -ba beleértjük a minta nélküli készülék és a minta együttes hőkapacitását.

c_k értékét legegyszerűbben úgy határozzuk meg, hogy a bedolgozás során fűtőtestet is építünk a mintába, és a minta lehülése után a már megkötött próbatestet újra felmelegítjük. Ugyanarról a kezdeti hőmérsékletről indulva, mint a hidratációhő mérésekor, és a próbatestet ugyanarra a véghőmérsékletre fűtve fel, a felfűtéshez szükséges hőmennyiség a következő képletből számítható:

$$Q = 0,239 \cdot U \cdot I \cdot t,$$

ahol U a fűtőellenállásra kapcsolt állandó feszültség, V;

I az áthaladó áramerősség, A;

t az áram áthaladásának az időtartama, s.

Ennek ismeretében

$$c_k = \frac{Q}{t}.$$

A hidratációhő a vizsgált összetétel esetén:

$$q = \frac{c_k \cdot \Delta T}{m_m}.$$

Az adiabatikus kaloriméter különösen az olyan vastagabb betonszerkezetek hőfejlődését modellezi helyesen, amelyeknek kicsi a hővezető képessége és jelentős a hőmérséklet-emelkedése.

Az Építőanyagok Tanszéken Szombathy Zoltán által megépített hőáramlásos kaloriméter 2.22. ábrán látható. A hőmérséklet-emelkedés–hidratáció tartama görbéből (2.23. ábra) a hidratációhőt kétféleképpen határozhatjuk meg.

A hidratációhőt meghatározhatjuk úgy, hogy a vizsgált cementhabarcsba fűtőellenállást építünk be, és a már lehűlt próbadarabot újra felfűtjük. Ha a fűtést úgy programozzuk, hogy a próbatest hőmérséklete ugyanazon görbén fusson végig, mint a hidratációhő mérése közben, akkor a fűtésre felhasznált elektromos munka a

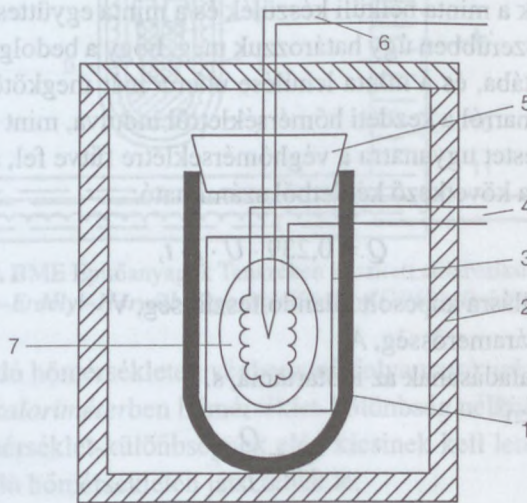
$$Q = 0,239 \cdot U \cdot I \cdot t$$

képletből közvetlenül adja a fejlődött hőmennyiséget.

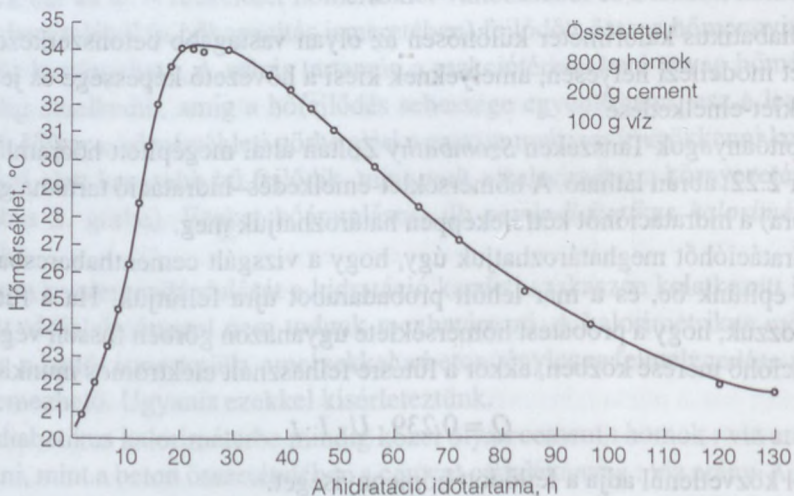
Ez az eljárás azonban lassú és nehézkes. Ezért a hőmérséklet-idő diagramból a következőképpen lehet számítani a fejlődött hőmennyiséget:

$Q = Q_1 + Q_2$,
 ahol Q_1 a hőmérséklet-idő görbéből számítható hőmennyiség, J;
 Q_2 a hővesztés okozta hőmennyiség, J;
 c_k megadja az 1 °C-kal való melegítéshez szükséges hőmennyiséget, azaz a kalori-
 méter hőkapacitását, amit ugyanúgy számítunk, mint az adiabatikus kaloriméterét.
 Ebből

$$Q_1 = c_k \cdot T$$



2.22. ábra. A BME Építőanyagok Tanszéken készített hőáramlásos kaloriméter: 1 – termosz, 2 – hőszigetelt doboz, 3 – rézedény, 4 – fűtés, 5 – parafa dugó, 6 – termoelem, 7 – minta
 [Balázs (1984)]



2.23. ábra. A habarcs hőmérséklete a habarcs kora függvényében, hőáramlásos kaloriméterben.
 Bedolgozási hőmérséklet 20 °C

A fűtés kikapcsolása utáni hőmérséklet-csökkenés (2.24. ábra) megadja a nem tökéletes hőszigetelés okozta hőveszteséget. Ebből megszerkeszthető a minta hőmérsékletétől függően a termoszhőveszteségi ábrája, J/h-ban (2.24c ábra). Ezután a hőveszteség okozta hőmennyiséget (Q_2) számítjuk ki:

$$Q_2 = \sum_{i=1}^n \Delta Q_{i, i-1} t_{i, i-1},$$

ahol c_k a készülék hőkapacitása, J/h;

ΔQ_i az $i, i-1$ -edik szakasz átlaghőmérsékletéhez tartozó hőveszteség, J;

t_i az $i, i-1$ -edik szakasz hossza, h.

A hidratációhő a következő képlettel számítható:

$$q = \frac{Q_1 + Q_2}{m_m},$$

ahol q a hidratációhő, J/g,

Q a számított hőmennyiség, J,

t_i a kísérlethez felhasznált minta tömege, g.

Adiabatikus kaloriméterben meghatározott hidratációhő valamivel nagyobb, mint a hőáramlásos kaloriméterben meghatározott, mivel a nagyobb hőmérséklet gerjeszti a hidratációt. Több méter vastag betonszerkezetek esetén az adiabatikus, kb. 2 m vastagságig a hőáramlásos kaloriméterrel lehet jobban modellezni a valóságos körülményeket.

A hidratációhő időbeli alakulásának a számítására *Balázs* (1987)-ben mutattunk példát.

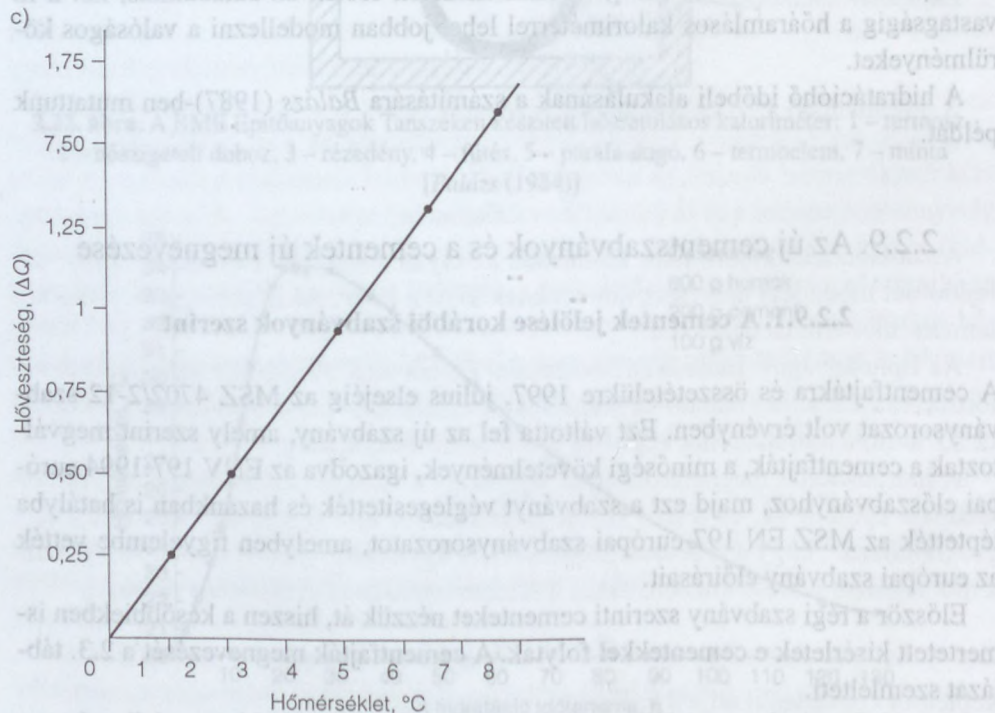
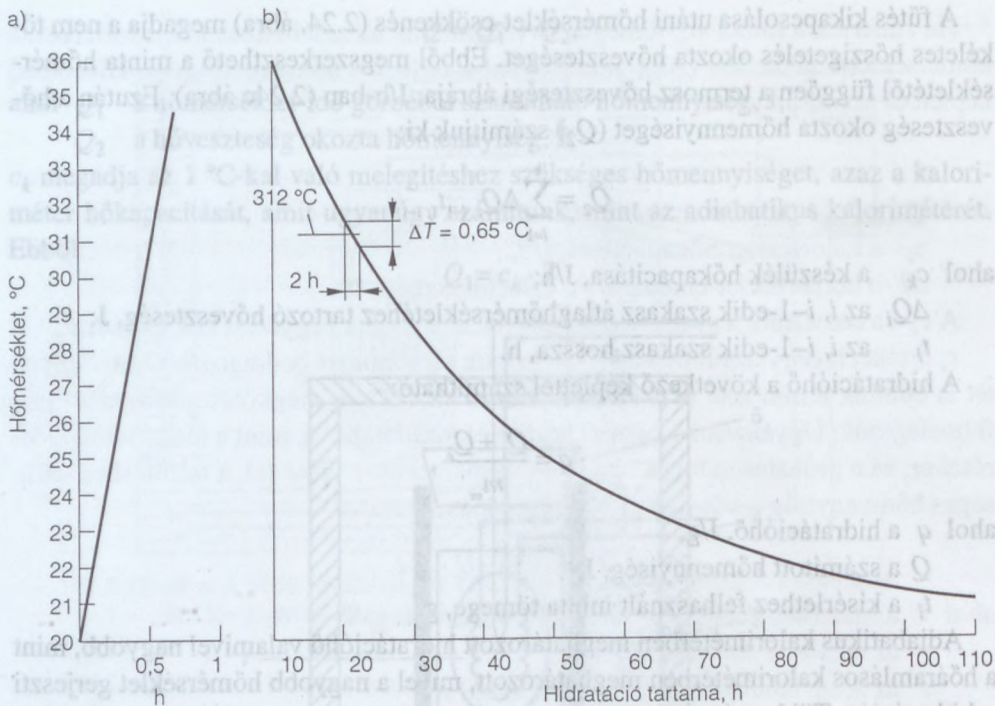
2.2.9. Az új cementszabványok és a cementek új megnevezése

2.2.9.1. A cementek jelölése korábbi szabványok szerint

A cementfajtákra és összetételükre 1997. július elsejéig az MSZ 4702/2-12 szabványsorozat volt érvényben. Ezt váltotta fel az új szabvány, amely szerint megváltoztak a cementfajták, a minőségi követelmények, igazodva az ENV 197:1994 európai előszabványhoz, majd ezt a szabványt véglegesítették és hazánkban is hatályba léptették az MSZ EN 197 európai szabványsorozatot, amelyben figyelembe vették az európai szabvány előírásait.

Először a régi szabvány szerinti cementeket nézzük át, hiszen a későbbiekben ismertetett kísérletek e cementekkel folytak. A cementfajták megnevezését a 2.3. táblázat szemlélteti.

Megelőző szabvány szemléletesen adta meg a cementek jelét, hiszen a jelben benne volt a szilárdsági követelmény és a hidraulikus pótlék fajtája és közelítő mennyisége.



2.24. ábra. Q_1 és Q_2 számításához szükséges segédgörbék.

a) a felfűtési függvény, b) a lehülési görbe, c) a hőmérséklet-hővesztés függvény

2.3. táblázat. A cementfajták megnevezése korábbi szabványok szerint

1974 előtti megnevezés	1974–1997 közötti megnevezés
700 pc	550 pc
600 pc	450 Rpc
600 pc	450 pc
S54 pc	S54 350 pc
600 pc	450 ppc 10
500 pc	350 ppc 20
600 pc	450 kspc 20
500 pc	350 kspc 40
400 pc	250 kspc 60
500 pc	350 kspc 20

2.2.9.2. A cementek jelölése az érvényes szabvány szerint

Az MSZ EN 197/1 szerinti cementfajtákat a 2.4. táblázat szemlélteti. A szabvány a cementeket öt fő csoportba sorolja. E csoportokat nézzük át röviden, megadva a régi szabvány szerint megközelítő cementfajtát. A cementek jelölésében közös a CEM jel.

A CEM I 52,5 (régi jele 550 pc) klinkerből és gipszkőből készített, nagy kezdő- és végszilárdságú portlandcement. A nagy kezdőszilárdságot az ásványi összetétellel és a cement finom őrlésével (fajlagos felület kb. 500 m²/kg) érik el. Hidratációhője nagy, ami nyári betonozás esetén óvatosságot igényel, a téli betonozást elősegíti.

A CEM I 42,5R (régi jele: 450R pc) tiszta portlandcement, az R betű még nagy kezdő és végszilárdságot jelöl, de már kisebbet a CEM I 52,5 jelű cementénél.

A CEM I 42,5 (régi jele 450 pc). Ásványi összetétele is eltérhet előzőktől, de fajlagos felülete csak 250–311 m²/kg.

A CEM I 32,5RS (régi jele S54 350R pc) szulfátálló portlandcement amiatt, mert klinkere nem tartalmaz C₃A klinkerásványt. Az R betű jelentős kezdőszilárdságot jelent, amit a fajlagos felület növelésével érnek el. Fenti cementekénél lényegesen kisebb a hidratációhője, szokványos a cement végszilárdsága.

A CEM I 32,5S (régi jele S54 350 pc) szulfátálló, mert nem tartalmaz C₃A-t, de fajlagos felülete csak 250–300 m²/kg, emitt normál szilárdulású.

A CEM I 32,5 A_cM (régi jele A_cM 350 pc) mérsékelt C₃A-tartalmú (6–8%), 250–300 m²/kg fajlagos felületű, szokványos szilárdulású, húzószilárdság szempontjából kedvező portlandcement.

A II jelű cementek heterogén portlandcementek, azaz a klinkeren és a 4–5% gipszkőn kívül hidraulikus pótlékot, ill. mészkőlisztet is tartalmaznak, amit betűjellel különböztetnek meg.

S – a granulált kohósalak,

P – a trasz,

V – a savanyú pernye,

L – a mészkő jele.

2.4. táblázat. Az MSZ EN 197/1 európai szabvány szerinti cementfajták és összetételük

Jel	Cementfajta neve	Jelölés CEM	Fő alkotórészek ¹					Mellék- alkotó- részek ²
			Klinker	Granulált kohósalak	Trasz	Savas pernye	Mészkeő	
			K	S	P	V	L	
I	Portlandcement	I	95–100	–	–	–	–	0–5
II	Kohósalak- portlandcement	II/A-S	80–94	6–20	–	–	–	0–5
		II/B-S	65–79	21–35	–	–	–	0–5
	Traszportland- cement	II/A-P	80–94	–	6–20	–	–	0–5
		II/B-P	65–79	–	21–35	–	–	0–5
	Pernyeportland- cement	II/A-V	80–94	–	–	6–20	–	0–5
		II/B-V	65–79	–	–	21–35	–	0–5
	Mészkeő- portlandcement ³	II/A-L	80–94	–	–	–	6–20	0–5
		II/B-L	65–79	–	–	–	21–35	0–5
Kompozit portlandcement ³	II/A-M	80–94	←6–20→		–	–	0–5	
	II/B-M	65–79	←21–35→		–	–	0–5	
III	Kohósalak- cement	III/A	35–64	36–65	–	–	–	0–5
		III/B	20–34	66–80	–	–	–	0–5
IV	Puccolán cement ³	IV/A	65–89	–	←11–35→		–	0–5
		IV/B	45–64	–	←36–55→		–	0–5
V	Kompozit- cement ³	V/A	40–64	18–30	←18–30→		–	0–5
		V/B	20–39	31–50	←31–50→		–	0–5

¹ A táblázatban lévő értékek nem tartalmazzák a kalcium-szulfát és az adalékok mennyiségét

² A mellékalkotórészek lehetnek töltőanyagok vagy a főalkotórészekből egy vagy több.

Ebben az esetben nem szabad főalkotórészként figyelembe venni.

³ Az egynél több kiegészítő anyagot tartalmazó cementek.

Ha – a mészkeőliszt kivételével – egyidejűen több hidraulikus pótlékot is tartalmaznak, akkor *kompozit cementeknek* nevezzük és M betűvel jelöljük.

Mindegyik cement tartalmazhat a fő alkotóból kevesebbet (jele A) vagy többet (jele B). A következő jelölésű cementeket szabványosították:

kohósalak-portlandcement CEM II/A-S 42,5 (régije jele 450 kspc 20)

CEM II/A-S 32,5 (régije jele: 350R kspc 20)

CEM II/A-S 32,5 (régije jele: 350 kpc 20)

CEM II/B-S 32,5 (régije jele: 350 kspc 40)

pernyeportlandcement CEM II/A-V 42,5 (régije jele: 450 ppc 10)

CEM II/A-V 32,5 (régije jele: 350 pp 10)

CEM II/A-V 32,5 (régije jele: 350 ppc 20)

traszportlandcement CEM II/A-P 42,5 (régije jele: 450 tpc 10)

CEM II/A-P 32,5 (régije jele: 350R tpc)

Új cement a mészkőportlandcement CEM II/A-L 32,5 (régi jele: 350 mpc 10) együtt legfeljebb 10 m% őrlött mészkövet, pernyét, valamint gipszkövet tartalmaz.

Új cement a kompozitportlandcement

CEM II/A-M 42,5 (régi jele: 450 kpc 20)

CEM II/A-M 32,5 (régi jele: 350 kpc 40)

Ezek a cementek együttesen legfeljebb 20, ill. 40 m% őrlött mészkövet, pernyét és gipszkövet tartalmaznak.

A III jelű cementek kohósalak cementek

CEM III/A 32,5 (régi jelölés nincs)

CEM III/B 32,5 (régi jelölés nincs)

Az A jelű cement legfeljebb 65 m%, a B jelű legfeljebb 80 m% granulált őrlött kohósalakot és gipszkövet tartalmaz.

A IV jelű cementek puccoláncementek

CEM IV/A 32,5 (régi jelölés nincs)

CEM IV/B 32,5 (régi jelölés nincs)

Az A jelű cement legfeljebb 35 m%, a B jelű legfeljebb 65 m% természetes puccolánt, savas jellegű pernyét és gipszkövet tartalmaz.

Az V jelű cementek kompozitcementek

CEM V/A 32,5 (régi jele nincs)

CEM V/B 32,5 (régi jele nincs)

Az A jelű cement legfeljebb 30 m%, a B jelű legfeljebb 50 m% kohósalakot, természetes puccolánt, savas jellegű pernyét és gipszkövet tartalmaz.

A cementtulajdonságok vizsgálata és az eredmények értékelési elve eltér a korábbi szabványokétól, statisztikai alapokra épül. A cementminősítés három eleme:

- Jellemző értékkel kell jellemezni a szabványos nyomószilárdságot, a kötési időt, a térfogatváltozást és a kémiai követelményeket.
- Az elfogadható hibaszázalék (alulmaradási küszöbérték), azaz a jellemző érték a szilárdságra 5%, a többi követelményre 10%.
- Egy cementszállítmány elfogadásának a valószínűsége.

A saját ellenőrzés kötelező, a vevő kérheti az adatokat. Ezenkívül lehet a külső ellenőrzés, amit a vevő rendel meg akkreditált laboratóriumban. Ennek a költségeit a vevő fizeti, kivéve, ha a cement e vizsgálat szerint nem felel meg a követelményeknek.

A cementek szilárdsági és fizikai követelményeit a 2.5. táblázat tartalmazza. A térfogatállandóságot (tágulás) a Le Chatelier-vizsgálattal kell jellemezni.

A cementek megfelelőségét rendszeresen ellenőrizni kell az MSZ EN 196-7 szerint vett egyedi mintákon. A vizsgálatok előírt gyakorisága a 2.6. táblázat szerinti.

2.5. táblázat. A mechanikai és a fizikai követelmények jellemző értékei

Szilárdsági osztály	Nyomószilárdság, N/mm ²			Kötéskezdet, perc	Tágulás mm
	Kezdeti szilárdság		Szabványos szilárdság		
	2 nap	7 nap	28 nap		
32,5N	–	≥16	≥32,5	≤52,5	≥75
32,5R	≥10	–			
42,5N	≥10	–	≥42,5	≤62,5	≥60
42,5R	≥20	–			
52,5N	≥20	–	≥52,5	–	≥45
52,5R	≥30	–			

2.6. táblázat. A cementvizsgálatok legkisebb gyakorisága folyamatos gyártás során

Időtartam	Nyomószilárdság	Kötéskezdet	Szulfát-tartalom	Térfogat-állandóság	Klorid-tartalom	Izzítási veszteség	Oldhatatlan maradék	Puccolánosság
hetente	2	2	2	1	–	–	–	–
havonta	–	–	–	–	2	2	2	2

2.7. táblázat. A k_A elfogadási állandó értékei (n = a vizsgálatok száma; 5% = P_k 5% esetén; 10% = P_k 10% esetén)

n	20–21	22–23	24–25	26–27	28–29	30–34	35–39	40–44	45–49
5%	2,40	2,35	2,31	2,27	2,24	2,22	2,17	2,13	2,09
10%	1,93	1,89	1,85	1,82	1,80	1,78	1,73	1,70	1,67

n	50–59	60–69	70–79	80–89	90–99	100–149	150–199	200–299	300–399	>400
5%	2,07	2,02	1,99	1,97	1,94	1,93	1,87	1,84	1,80	1,78
10%	1,65	1,61	1,58	1,56	1,54	1,53	1,48	1,45	1,42	1,40

A nyomószilárdságot és a kötési időt méréses, a többi tulajdonságot minősítéses ellenőrzéssel kell meghatározni.

A méréses ellenőrzések esetén ki kell számítani a gyári összes vizsgálatból 6–12 hónapos időszakra a jellemző értéket az

$$L \leq X - k_A \cdot s,$$

$$U \leq X + k_A \cdot s$$

képletből. A képletekben

X a vizsgált eredmények számtani középértéke,

s a vizsgálati eredmények négyzetes szórása,

k_A az elfogadási állandó,

L a 2.5. táblázat szerinti alsó, U a felső határérték.

A k_A elfogadási állandó, amely a jellemző érték meghatározásához szükséges, a P_k valószínűségtől, valamint a vizsgálati eredmények n számától függ. A szabvá-

nyos szilárdságra 5%, a kezdő és szabványos szilárdság felső határértékére, valamint a fizikai és egyéb követelményekre 10%. A k_A elfogadási állandó értékeit a 2.7. táblázat tartalmazza.

A vizsgálati eredményekből meg kell szerkeszteni a gyakorisági hisztogramokat. Ha ez nem hasonlít a normális Gauss-eloszlásra, akkor sűríteni kell a mintavétel gyakoriságát a 2.6. táblázathoz képest. A minősítés ellenőrzés során meg kell határozni a jellemző értékeknél kisebb értéket adó vizsgálati eredmények számát (c_D , db) és ezt össze kell hasonlítani a vizsgálati eredmények n száma alapján az önellenőrző vizsgálati eredmények 10% átvételi valószínűséghez tartozó c_A értékkel (2.8. táblázat).

2.8. táblázat. A 10% átvételi valószínűséghez tartozó c_A érték

Vizsgálatok száma, n	20–39	40–54	55–69	70–84	85–99	100–109
c_A	0	1	2	3	4	5

Megjegyzés: $n > 20$ mellett statisztikailag megalapozott megfeleléségi feltételt nem lehet megadni (a c_A értéke mindig zérus)

A megfelelés akkor teljesül, ha $c_D \leq c_A$.

A cementeknek ki kell elégíteniük a statisztikai megfelelésen kívül az egyes eredmények határértékeire vonatkozó követelményeket is (2.9. táblázat).

2.9. táblázat. Az egyedi eredmények határértékei

Tulajdonságok		Határértékek szilárdsági osztályonként					
		32,5N	32,5R	42,5N	42,5R	52,5N	52,5R
Nyomószilárdság, N/mm ² alsó határérték	2 napos	–	8,0	8,0	18,0	18,0	28,0
	7 napos	14,0	–	–	–	–	–
	28 napos	30,0	30,0	40,0	40,0	50,0	50,0
Kötéskezdet, perc, alsó határérték		60		50		40	
Térfogatállandóság, mm, felső határérték		10					
Szulfáttartalom, tömeg%, felső határérték	CEM I, CEM II, CEM IV, CEM V	4,0			4,5		
	CEM III	4,5					
Kloridtartalom, tömeg%, felső határérték ¹		0,1					
Puccolánosság		megfelel 15 napos korban					

¹ A CEM III cementfajta kloridtartalma 0,1 tömeg%-nál nagyobb lehet, de ebben az esetben meg kell adni a tényleges kloridtartalmat

A 28 napos szabványos kötőerő vizsgálatához a habarcs összetétele:
 510 kg/m³ cement,
 255 kg/m³ víz (víz–cement tényező 0,5),
 1530 kg/m³ szabványhomok.

A jelenlegi, részben új cementfajtákkal a laboratóriumi vizsgálatok jelenleg is folynak. A betongyáraknak az ajánlható, hogy végezzenek előkísérleteket a cement-tartalom, víz–cement tényező, utókezelés, eltarthatóság, hidegben, gőztérben szilárdulás hatásának ellenőrzésére.

2.2.9.3. 2005 elején gyártott cementfajták

Kérésemre dr. Révay Miklós a CEMKUT Kft. tudományos tanácsadója megadta a 2005. januárban gyártott cementfajtákat cementgyáranként és megadta tájékoztató összetételüket (2.10. táblázat).

2.10. táblázat. A hazai cementgyárak által gyártott cementfajták és hozzávetőleges összetételük

Gyár	Cement	Kohósalak	Pernye	Mészkő
Beregend	CEM I 52,5 N	–	–	–
	CEN I 42,5 N	–	–	–
	CEM II/A-M (V-L) 42,5 N	–	~10%	~5%
	CEM II/B-M (V-L) 32,5 R	–	~20%	~10%
	CEM II/B-M (V-L) 32,5 N	–	~20%	~10%
Vác	CEM I 52,5 N	–	–	–
	CEN I 42,5 N	–	–	–
	CEM II/A-S 42,5 N	~20%	–	–
	CEM II/B-S 32,5 R	~35%	–	–
	CEM II/B-S 32,5 R	~35%	–	–
	CEM III/A 32,5 N	~40–45%	–	–
	CEM III/B 32,5 N-S	~55–60%	–	–
Hejőcsaba	CEM I 42,5 R	–	–	–
	CEM II/A-S 42,5 N	~20%	–	–
	CEM II/B-S 32,5 N	~35%	–	–
	CEM II/B-M (S-V) 32,5 N	~30%	~10%	–
	CEM III/A 32,5 N	~40–45%	–	–
Lábatlan	CEM I 32,5 R-S (S-54)	–	–	–
	CEM II/A-V 32,5 R-S	–	~10%	–
	CEM II/A-V 42,5 N	–	~10%	–
	CEM II/B-V 32,5 R	–	~20%	–
	CEM II/B-V 32,5 N	–	~20%	–

2.3. Az adalékanyag

2.3.1. Az adalékanyagok jellemzése

Az adalékanyag tömör vagy porózus, természetes vagy mesterséges anyagok halmaza. A *természetes adalékanyagok* kőzetek természetes aprózódásából keletkeznek vagy e kőzetekből aprítással állítják elő. A *mesterséges adalékanyagok* lehetnek ipari hulladékok (pl. kazánsalak), ipari melléktermékek (pl. granulált kohósalak) vagy külön e célra ipari módszerekkel előállított anyagok (pl. pernyekavics, polisztirolgyöngy, habüveg).

Az építési tevékenység során hazánkban adalékanyagként elsősorban természetes aprózódású folyami vagy bányából származó homokoskavicsot használnak, de az utóbbi időben nő a zúzott adalékanyagok részaránya. Ugyanakkor mesterséges anyagot – a kohósalak kivételével – alig használnak fel.

A különböző betonokhoz felhasznált természetes adalékanyagokat a 2.11. táblázatban, eredetük szerint a 2.12. táblázatban foglaltuk össze.

A betonokat – testsűrűségük szerint – nehézbeton, beton és könnyűbeton csoportba soroljuk. Eszerint eltérnek az adalékanyagok.

a) Nehézbeton adalékanyagai. Az atom- és a neutronsugárzás elleni védelemhez egyrészt nagy testsűrűségű adalékkőzetre, másrészt nagy hidrátvíztartalmú anyagokra van szükség.

Kémiaiilag kötött vizet nem tartalmazó, ún. nehéz adalékanyagok: barit, magnetit, hematit, színesfém-salak, vashulladék, acélsörét, ferroötvözetek. *Víztartalmú nehéz adalékanyagok:* limonit és bauxit.

b) A beton adalékanyagai. Leggyakrabban használt adalékanyagok a folyókból és bányákból kitermelt, természetes aprózódású homokoskavicsok. Emellett egyre növekvő mennyiségben állítanak elő zúzással homokot és zúzalékot. E kőzetek alapanyaga mészkő, dolomit, andezit, bazalt, kohósalakkő és természetes aprózódású kavics.

A természetes adalékanyagok szemmagyság szerinti megnevezését a 2.11. táblázat, felhasználási területük és eredetük szerinti csoportosítását a 2.12. táblázat tartalmazza. Hazánkban *homok*nak nevezzük a 4 mm-nél kisebb és *kavics*nak a 4 mm-nél nagyobb szemmagyságú adalékanyagot.

c) Könnyűbeton adalékanyagai:

1. Szerkezeti könnyűbetonok természetes könnyű adalékanyaga a vulkáni tufa, a habkő és a lávasalak. A *vulkáni tufák* vulkáni kitörések visszahulló láva- és hamutömegeiből keletkeztek, pórustartalmuk 10–60 V% között ingadozik. A *habkő* a riolit és a kvarcporfir üveges módosulata. Szivacsos szerkezetű, világos színű, nagy pórustartalmú és kis testsűrűségű anyag. Hazánkban csak kis mennyiségben fordul elő. A *lávasalak* vulkanikus kitörések által létrehozott kiömlések felső rétegeiben található meg. Ha a lehülés lassúbb, akkor kristályos szerkezetű, salakszerű. Hazánkban a Balaton északi partján lévő hegyláncolatban található.

2.11. táblázat. Homok, kavics, homokos kavics betonadalékanyagok szemmagysága (MSZ 4798-1:2004)

Megnevezés/ osztály	Névlés szemmagysághatár		Feltétel	Ellenőrző szita		Példa mm/mm
	Legkisebb, d	Legnagyobb d_{\max} szemmagyság, mm		Szitanyílás, mm	Áthullott anyag tömegszázaléka	
Homok/ G_{F85}	$d = 0$	$d_{\max} \leq 4$	-	0,063 $d_{\max}/4$ $d_{\max}/2$ d_{\max} $1,4 \times d_{\max}$ $2 \times d_{\max}$	0-10 ^a ; 0-5 ^b ; 0-3 ^c 20-60 50-90 85-99 95-100 100	0/1 ^a ; 0/2 ^b ; 0/4 ^c
Homokfrakció/ $G_{F85/20}$	$d > 0$	$d_{\max} = 4$	-	0,063 $d/2$ d 4 $1,4 \times d_{\max}$ $2 \times d_{\max}$	0-3 0-10 0-20 85-99 95-100 100	1/4; 2/4
Homokos kavics frakció/ $G_{C85/20}$	$d = 2$	$4 < d_{\max} \leq 11,2(12)^d$	Szűk frakció $d_{\max}/d \leq 6$	0,063 $d/2$ d $d_{\max}/1,4$ d_{\max} $1,4 \times d_{\max}$ $2 \times d_{\max}$	0-3 0-5 0-20 25-70 85-99 98-100 100	2/8; 2/12
Homokos kavics frakció/ $G_{C90/15}$	$d = 2$	$11,2(12)^d < d_{\max} \leq 20$	Nyújtott frakció $6 < d_{\max}/d \leq 10$	0,063 $d/2$ d $d_{\max}/2$ d_{\max} $1,4 \times d_{\max}$ $2 \times d_{\max}$	0-3 0-5 0-15 25-70 90-99 98-100 100	2/16; 2/20

2.11. táblázat (folyt.) Homok, kavics, homokos kavics betonadalekanyagok szemmagysága (MSZ 4798-1:2004)

Megnevezés/ osztály	Névleges szemmagysághatár		Feltétel	Ellenőrző szita		Példa mm/mm
	Legkisebb, d	Legnagyobb d_{\max} szemmagyság, mm		Szitanyílás, mm	Áthullott anyag tömegszázaléka	
Kavicsfrakció $G_C80/15$	$d = 4$	$d_{\max} \geq 8$	Szűk frakció $d_{\max}/d \leq 2$	0,063 $d/2$ d $d_{\max}/1,4$ d_{\max} $1,4 \times d_{\max}$ $2 \times d_{\max}$	0-3 0-5 0-15 25-70 80-99 98-100 100	4/8; 8/16; 16/32
Kavicsfrakció $G_C85/15$	$d \geq 4$	$d_{\max} > 8$	Nyújtott frakció $d_{\max}/d > 2$	0,063 $d/2$ d $d_{\max}/2$ d_{\max} $1,4 \times d_{\max}$ $2 \times d_{\max}$	0-3 0-5 0-15 25-70 85-99 98-100 100	4/16; 8/24; 8/32
Homokos kavics	$d = 0$	$d_{\max} \leq 63$		NAD M1-NAD M8. ábra szerint		

a, b, c A 0/1; 0/2; 0/4 mm szemmagyságú homok 0,063 mm nyílású szitán áthulló megfelelő megengedett tömegszázaléka

d Magyarországon szabad a zárójelben feltüntetett nyílású szitát használni (lásd még a szabvány M mellékletét)

2.12. táblázat. A betonok adalékanyagai eredetük szerint

A beton megnevezése	Természetes aprózódású adalékanyag	Adalékanyag, zúzott	Mesterséges adalékanyag
Nehézbeton	barit magnetit	barit hematit magnetit limonit bauxit	színesfém-salak vashulladék acélsörét ferroötvözetek
Beton	folyami homok, folyami kavics, bányahomok, bányakavics, homokos kavics	zúzott homok, zúzalék, zúzottkő, zúzottkavics	szilícium-karbid habosított kohósalak újrahasznosított beton kőgyagzúzalék
Könnyűbeton		vulkáni tufahabkő lávahalak	újrahasznosított téglazúzalék kazánsalak kohósalak pernyekavics keramzit perlit vermikulit műanyag hab habüveg

2. Szerkezeti könnyűbetonok mesterséges könnyű adalékanyagai: a téglazúzalék, a kazánsalak, a habosított kohósalak, a pernyekavics, a keramzit és a habkavics.

A *téglazúzalék* a téglagyártás selejtes termékeiből, szanált téglapületek tégláiból zúzással előállított adalékanyag.

A *kazánsalak* a kazánokban elégetett szén visszamaradt hamuja, ill. salakja. A salakok tulajdonságai az elégetett szén minőségétől függően különbözőek, éppen ezért építkezéshez csak azokat a salakokat szabad felhasználni, amelyeknek a szén- és kéntartalma a megengedett határ alatt van. Halmazsűrűsége 600–850 kg/m³, a szétmorzsolódási tényezője legfeljebb 1,6. A magyar salakok általában sok ként tartalmaznak. Ha a kéntartalmat nem csökkentik a megengedett mennyiség alá, akkor az a cementtel reakcióba lép, és a C₃A·3CaSO₄·31H₂O cementbacillus keletkezik, amely duzzad és kedvezőtlen esetben a salakbeton teljes szétesését eredményezheti.

A *kohóhabsalakot* a kohósalak habosítása útján állítják elő úgy, hogy a legalább 1150 °C hőmérsékletű kohósalak-olvadékot kis mennyiségű vízbe öntve a fejlődő gőzök és gázok az anyagot felduzzasztják, más néven habosítják.

Az anyag habosodás közben hűl le, megmerevedik, majd megszilárdul. Ebből aprítással állítják elő a kohóhabsalaknak nevezett könnyűbeton adalékanyagot. A habsalak nem tartalmazhat káros szennyeződések. Halmazsűrűsége 600–800 kg/m³, szétmorzsolódási tényezője legfeljebb 1,3. A kohósalak azáltal lesz könnyű, hogy szemcseporozitása legalább 50%.

A *pernyekavics* erőművi pernyéből agyag, ill. bányameddő hozzákeverésével kiégetés révén keletkező adalékanyag. Csak jól kiégett, egyenletes minőségű pernyekavics használható. Halmazsűrűsége 600–650 kg/m³, szétmorzsolódási tényezője legfeljebb 0,6.

A *duzzasztott agyagkavics* (keramzit) agyagászványokban és vas-oxidban gazdag agyag és szerves anyag összekeverésével nyert, és kb. 1200 °C hőmérsékleten duzzasztott adalékanyag. Halmazsűrűsége kb. 400 kg/m³.

Sem a duzzasztott pernyekavicsban, sem a duzzasztott agyagkavicsban nincs 1 mm-nél kisebb szemcse. Azt vagy zúzással kell előállítani vagy természetes homokkal kell pótolni.

A „Geofil-Bubbles” márkanevű könnyű adalékanyag nagy üvegtartalmú, ipari és kommunális hulladékokból előállított *habüveg* (Feltaláló: Hoffmann László és társai). A hulladéküveg tartalmazhat szerves vagy szervetlen szennyezéseket (sör, bor, papírcímke, kupak stb.). A gyártás során a nagy üvegtartalmú hulladékot megfelelő szemcseméretűre őrlik, de alapanyag összetételétől függően különböző mennyiségű gázképző hulladékkal homogenizálják. A granulálást olvadáspont-csökkentő és viszkozitás-módosító adalékok felhasználásával végzik. A granulátumokra nagy fajlagos felületű anyagból külső burkot vonnak a vízfelvétel szabályozása érdekében. Szárítás után forgókemencében hőkezlik, ahol megduzzad és elnyeri végleges méretét. Az így kapott habüveg szemcsék 280–1800 kg/m³ testsűrűségűek, 2–25 mm átmérőjűek, jó hőszigetelő képességűek, jól tapadnak a kötőanyaghoz (cement, gipsz, műgyanta).

Hőszigetelő könnyűbetonok adalékanyagai. A természetben található perlit vulkanikus eredetű üveg, 3–5 m% víztartalommal. Ha a perlitet 900–1200 °C-ra felhevítik, akkor víztartalma gőzzé válik, amely a piropasztikus állapotba kerülő ásványt 20–30-szoros térfogatúra felduzzasztja. Ez a *duzzasztott perlit*. Az anyag duzzadása annál nagyobb, minél nagyobb az erősen kötött víztartalma. A duzzasztott perlit osztályozása halmazsűrűsége szerint a következő:

Jele	Megnevezése	Halmazsűrűsége, kg/m ³	Szemcsemérete, mm
P3	Finom perlit	40–80	0/0,5
P2	Középfino perlit	30–70	0/1,0
P1	Középszemcsés perlit	80–120	0,5/2,0
Pd	Durvaperlit	80–150	1,0/3,0
Pid	Igen durva perlit	100–200	1,0/5,0

Ezek közül betonkészítésre csak a szemcsés, a durva- és a nehézperlit használható fel. A perlit nem tartalmazhat betonszilárdulást károsan befolyásoló szennyeződések. A perlitnek kicsi a szemcsezilárdsága és halmazsűrűsége, ezért csak hőszigetelő betonok és hőszigetelő vakolatok készítésére használható.

Hasonlóan állítják elő csillámban gazdag agyagászványokból a *vermikulitot*. Ezt hazánkban nem gyártják.

Újabbán gömb alakúra habosított *polisztirolgyöngyöt* is előállítanak. Halmazsűrűsége 15–30 kg/m³. Átmérője 2–5 mm. A szemcséknek nincs szilárdsága.

Könnyű adalékként a *fa* is számításba vehető.

2.3.2. Az adalékanyagok tulajdonságai

2.3.2.1. A tulajdonságokról általában

Az adalékanyagok legfontosabb tulajdonságai:

- a közetfizikai tulajdonság,
- a tisztaság,
- a szilárdság,
- a szemszerkezeti tulajdonságok,
- a tömeggel kapcsolatos jellemzők,
- a víztartalmi tulajdonságok,
- az időállóság.

Adalékanyagként nem használhatók a mállott kőzetek, az agyagtartalmú mészkövek, az agyagpala, a csillámban gazdag kőzetek, a gipsztartalmú kőzetek, a nagy pórustartalmú puha homokkövek.

Az adalékanyagként használt kőzet jellemezhető közettani vizsgálatokkal, közetfizikai állapotokkal, a tömegeloszlási jellemzőkkel és a szilárdsággal.

Tiszta a kőzet, ha nem tartalmaz vagy csak megengedhető mértékben tartalmaz olyan szennyeződések, amelyek a cement kötését és szilárdulását, szilárdságát, a betonozott acélbetét korrózió elleni védelmét károsan befolyásolják. A szennyező anyagok lehetnek szervesek és szervetlenek.

2.13. táblázat. Az egyes vizsgálatoknál a vizsgálati anyag megengedett legnagyobb szemnagysága

Vizsgálat megnevezése	Megengedett legnagyobb szemnagysága, mm
Atterberg-féle vizsgálat	0,25
Szemmegoszlás meghatározása szedimentációs mérleggel	0,125
Andreasen-féle vizsgálat	0,125
0,02 mm-nél kisebb szemek mennyiségének meghatározása szívócsővel	63
Hidrometrálás	0,125
Homokegyenérték meghatározása	2
Iszap- és agyagtartalom térfogatosságot ülepítő vizsgálata	4

A szilárdságot az adalékközet nyomószilárdságával, az egyes szemcsék szilárdságával, az adalékhalmoz nyomás hatására bekövetkező szétmorzsolódásával és az adalékanyag felhasználásával készített beton szilárdságával lehet jellemezni.

Előírásaink szerint folyami kotrásból vagy bányából származó adalékanyagok szilárdságilag megfelelőek, a zúzott köveket pedig az adalékhalmoz szilárdsági és időállósági tulajdonságaival kell jellemezni.

A szem szerkezeti tulajdonságok közé tartozik a szemmegoszlás, a legkisebb és a legnagyobb szem nagyság, a szemalak és az adalékanyag szemek felülete.

A tömeggel kapcsolatos jellemzők: sűrűség, testsűrűség, halmazsűrűség, porozitás.

A víztartalmú jellemzők közül a vízfelvétel és a nedvességtartalom a legfontosabb.

2.3.2.2. A tisztasági jellemzők és vizsgálatuk

[Balázs (1984)]

Az adalékanyag legfinomabb alkotóit agyagnak, iszapnak, pornak és homoklisztnek nevezzük. A betonok adalékanyagait eredetük szerint a 2.12. táblázatban foglaltuk össze.

A megnevezés ez esetben nem jelenti az alkotó minőségét, csak szem nagyságát. Az agyag sem jelenti, hogy azt feltétlenül agyagásványok alkotják. Nem feltétlenül károsak a finom részek, ha mennyiségük kicsi és egyenletesen elosztottak.

Az első három szemcsecsoport mindig káros, ha mennyisége nagy, mert növeli a beton víz- és cementpéigényét, zsugorodását és rontja fagyállóságát. Kis mennyiségben is károsak, ha az adalékszempcsékre tapadva a keveréskor nem dörzsolődnek le és rontják a cementpép és adalékanyag közötti tapadást. Károsak, ha rögök formájában maradnak, mert ez folytonossági hiányt jelent a betonban, nő az acélbetét korróziójának veszélye a vasbetonban. Ezért a korszerű adalék-előkészítés során ezeket kimossák az adalékanyagból, ill. betonfajtánként megkötik a megengedett mennyiséget. Ezzel szemben a *0,063–0,25 mm-es frakciók mennyisége mind a szivattyúzhatóság, mind a beton tömörsége és cementtakarékosság miatt igen lényeges*, és ha ki-mosták volna, célszerű pótolni.

A finom adalékanyag-részek vizsgálatára használt módszereket és e vizsgálatoknál megengedett legnagyobb szem nagyságot a 2.13. táblázatban szemléltetjük.

Mind a cement, mind az adalékanyag szemmegoszlása csak $\geq 63 \mu\text{m}$ esetén határozható meg szitálással. Általában $100 \mu\text{m}$ -ig használjuk a vizes osztályozó módszereket, melyek azon az elven alapulnak, hogy a különböző átmérőjű szemcséknek folyadékoszlopban különböző az esési sebessége. Valamennyi vizsgálatnál – közvetve vagy közvetlenül – a Stokes-képletet használjuk, amely szerint a d átmérőjű szemcse h úthosszra vonatkoztatott ülepedési ideje:

$$t = \frac{18\eta_f \cdot h}{(\rho_s - \rho_f) d^2 \cdot g}$$

képletből számítható, ahol

t az ülepedés ideje, s;

h a megtett út, m;

η_f a folyadék viszkozitása, Pa · s;

ρ_f ill. ρ_{sz} a folyadék, ill. a vizsgált szilárd anyag sűrűsége, kg/m³;

d a szemmagyság, m;

g a nehézségi gyorsulás, m/s².

A vizsgálatokat az MSZ 18288/2-84 szerint ismertetjük.

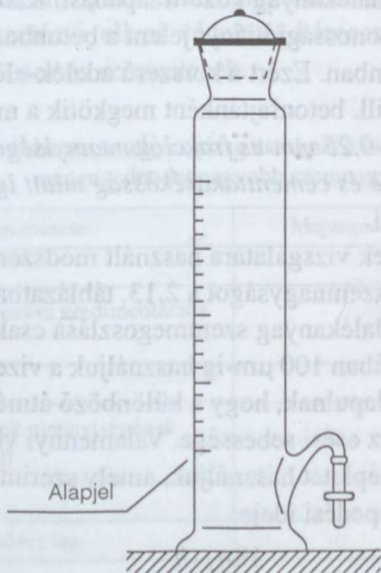
Az **Atterberg-féle iszapolás** elve az, hogy az eltérő ülepedési sebességű anyagot két részhalmozatra választjuk és meghatározzuk ezek tömegarányát.

A vizsgálatra csak előzetesen ki nem szárított, 0,25 mm-nél kisebb nagyságú szemek alkalmasak.

A vizsgálathoz legalább 5 cm átmérőjű, Atterberg-féle iszapolóhengert használunk (2.25. ábra). A henger kivezető nyílása csappal elzárható gumicsőben folytatódik, amely alá megfelelő méretű edényt teszünk. A hengeren alapjel van, amely a nyitott csapnál a hengerben maradó vízszintet jelöli. A hengeren az alapjeltől kezdődően cm-ként osztásjelek vannak, külön kiemelve az 5 cm-es osztásokat.

A szétválasztás nagyságát (d_x) a 2.14. táblázat tartalmazza, megadva a d_x méretű szem $h_o = 5$ cm eséséhez szükséges t_x időt az anyagsűrűség függvényében.

A vizsgálat előkészítéseképpen a vizsgálati anyagot 0,001 g pontosan lemérjük, desztillált vízzel szétáztatjuk és bemossuk az iszapoló hengerbe. A zagy hőmérséklete 15–25 °C legyen. A tényleges hőmérsékletnek megfelelő ülepedési időt a 2.14. táblázatból interpolálással határozzuk meg.



2.25. ábra. A szívócsöves készülék a 0,02 mm-nél kisebb szemek mennyiségének a meghatározására

Az iszapoló hengert meghatározott kerek 5,0 cm-es osztásjelig feltöltjük a desztillált vízzel, 5 percen át – motoros keverővel – keverjük, majd vízszintes lapra helyezve ülepedni hagyjuk. $n \cdot t_x$ idő eltelte után (n az 5 cm-es osztások száma, ameddig a hengert feltöltöttük) a hengeren lévő csapot kinyitjuk és a zagyot a cső alá tett edényben felfogjuk. Utána a hengert újra feltöltjük desztillált vízzel az $n \cdot 5$ cm-es szintig megint intenzíven keverjük és a meghatározott idő elteltével újból a felfogó edénybe engedjük. Ezt a műveletet legalább ötször megismételjük, míg a víz teljesen tisztának látszik.

2.14. táblázat. A d_x méretű szem 5,0 cm-es eséséhez szükséges t_x idő

d_x mm	Zagyhőmérséklet °C	A d_x méretű szem 5,0 cm-es eséséhez szükséges t_x idő		
		2300	2500	2700
kg/m ³ anyagsűrűség esetén				
0,2	15	3,1 s	2,7 s	2,5 s
	20	2,9 s	2,6 s	2,4 s
	25	2,7 s	2,5 s	2,3 s
0,125	15	7,0 s	6,2 s	5,5 s
	20	6,4 s	5,6 s	5,0 s
	25	5,8 s	5,1 s	4,6 s
0,1	15	8,2 s	7,0 s	6,2 s
	20	7,2 s	6,3 s	5,7 s
	25	6,6 s	5,8 s	5,2 s
0,063	15	25,7 s	22,4 s	19,8 s
	20	22,9 s	20,0 s	17,5 s
	25	20,2 s	17,6 s	15,7 s
0,02	15	3 min 21 s	2 min 52 s	2 min 32 s
	20	2 min 58 s	2 min 34 s	2 min 13 s
	25	2 min 36 s	2 min 17 s	1 min 59 s
0,01	15	13 min 25 s	11 min 38 s	10 min 15 s
	20	11 min 53 s	10 min 18 s	9 min 05 s
	25	10 min 28 s	9 min 05 s	8 min 0 s
0,005	15	53 min 30 s	46 min 30 s	41 min 0 s
	20	47 min 30 s	41 min 0 s	36 min 30 s
	25	42 min 0 s	36 min 30 s	32 min 0 s
0,002	15	5 h 35 min	4 h 50 min	4 h 16 min
	20	4 h 57 min	4 h 17 min	3 h 47 min
	25	4 h 20 min	3 h 47 min	3 h 20 min
0,001	15	22 h 20 min	19 h 23 min	17 h 05 min
	20	19 h 48 min	17 h 10 min	15 h 08 min
	25	17 h 25 min	15 h 08 min	13 h 23 min

Az anyagot minden alkalommal két részre választjuk szét. Az iszapoló hengerben a d_x szemnagyságúnál nagyobb, a felfogó edényben annál kisebb szemek alkotják a zagyot. Utána a felfogó edényben lévő zagyot lepároljuk. Bepárlás után meghatározzuk a részhalmazok tömegét 0,001 g pontosan:

$$m_{0-1}, m_{1-2}, m_{i, i+1}, m_{(n-1), n}, m_n,$$

ahol m_{0-1} a legkisebb d_1 szemnagyságú d_x rész tömege.

Ha minden d_x -hez meghatároztuk a finom anyag tömegét, akkor abból minden d_x szemnagyságra kiszámítjuk az annál kisebb (A_x) és annál nagyobb (B_x) szemek mennyiségét tömegszázalékban 1% pontosan:

$$A_x = \frac{m_k}{m_k + m_n} \cdot 100,$$

$$B_x = \frac{m_n}{m_k + m_n} \cdot 100.$$

Hasonlóan meghatározhatjuk a két szemnagyság közé eső szemek mennyiségét.

Mértékadó eredmény az azonos vizsgálati anyagból külön-külön nyert, legalább két olyan eredmény átlaga, amelyek között az eltérés legfeljebb két tömegszázalék. A mértékadó eredmény és a szemmegoszlási görbe a *teljes eredmény*.

A szemmegoszlás meghatározása szedimentációs mérleggel

A vizsgálat elve az, hogy automatikusan regisztráljuk az ülepitő hengerbe helyezett és mérleggel összekapcsolt nyeles tányérra ülepedett anyagmennyiséget 0,001–0,125 mm tartományban és a szemmegoszlást meghatározzuk.

A vizsgálati eszköz olyan mérleg, amelynek egyik karjára az ülepitő mérőhengerbe nyúló nyeles tányért függesztünk, a másik karját adott mérési lépcsőkben rajzoló egységhez kapcsoljuk, amely a nyeles tányérra ülepedő anyag mennyiségét méri és a mért értéket az idő függvényében rögzíti. Ilyen mérleg pl. a SARTORIUS 4600 szedimentációs mérleg.

A szemnagyságot (d) 0,001 mm pontossággal a Stokes-törvénnyel számítjuk ki:

$$d = 135,4571 \sqrt{\frac{L \cdot \eta}{t \cdot (\rho_s - \rho_w)}},$$

ahol d a szemnagyság, mm;

η a víz dinamikai viszkozitása N s/m²;

ρ_s a vizsgálati anyag anyagsűrűsége, kg/m³;

ρ_w a víz sűrűsége kg/m³;

g a nehézségi gyorsulás, 981 cm/s²;

L ülepedési út a műszerkönyv szerinti pontossággal, cm;

t a mérés kezdetétől eltelt idő, s.

Adott t időponthoz és d_x szemmagysághoz tartozó ülepedett anyagmennyiséget (m_x) az alábbi képlettel számítjuk ki, mg-ban:

$$m_x = \frac{n \cdot \Delta m_x \cdot \rho_s}{\rho_s - \rho_w},$$

ahol n a $t = 0$ időponttól rajzolt lépcsők száma,

Δm_x vizsgálati tömeglépcső.

Minden választott d_x szemmagyságra ki kell számítani az annál nagyobb szemek mennyiségét tömegszázalékban (B_x), 0,1% pontossággal:

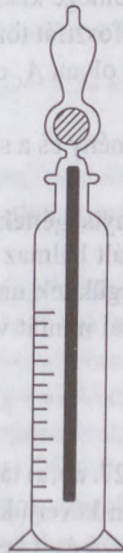
$$B_x = \frac{m_x}{\sum_{i=1}^n m_{x_i}} \cdot 100.$$

A mértékadó eredmény legalább két egymástól független mérési eredmény átlaga.

Teljes eredmény a mértékadó eredmény és a szemmegoszlási görbe.

Andreasen-féle ülepités

A vizsgálat elve: a vizsgálandó szemmagyságok ülepedési sebességének megfelelő időpontokban az Andreasen-féle készülékben (2.26. ábra) lévő és a vizsgálati anyagot tartalmazó zagyból mintát veszünk, azt lepároljuk.



2.26. ábra. Andreasen-készülék

Az ülepitő henger térfogata kb. 250 cm^3 , a pipettáké kb. 15 cm^3 . A felfogó edények általában 5 cm-es osztással ellátott, 50 cm^3 térfogatú alacsony főzőpoharak.

A minta előkészítése hasonló az Atterberg-féle iszapolás előkészítésével, de a legnagyobb szemmagyság 0,125 mm. 5 g pormintát öntünk az Andreasen-készülékbe. Utána annyi 1 g/l töménységű, desztillált vízzel készített nátrium-pirofoszfát oldatot öntünk a készülékbe, a pelyhesedés elkerülésére, hogy elérje a legfelső jelet. Majd összerázzuk és 24 órán át állni hagyjuk. A zagygal töltött ülepítő hengert ultratermosztátba tesszük és a zagy hőmérsékletét a 2.14. táblázat valamelyik hőmérsékletére beállítjuk.

24 óra elteltével a zagyot felrázzuk, szintjét a legfelső jelig beállítjuk, a pipettát desztillált vízzel lemossuk. Leszívunk kb. 15 cm³-t $t_1 = 0$ időpontban. Majd előre meghatározott t_x időpontokban újból leszívunk 15 cm³-t és másik felfogó edénybe engedjük. A pipettát minden szívás után lemossuk és a mosóvizet az utolsónak leszívott zagyot tartalmazó felfogó edénybe tesszük. A leszívást addig ismételjük, amíg lehet. Utána a kiszáritott állapotú minták m_x tömegét 0,001 g pontosan lemérjük.

A vizsgálati eredmény minden d_x szemmagysághoz tartozó, annál kisebb szemek mennyisége (A_x) tömegszázalékban, 0,1% pontosan

$$A_x = \frac{m_x - m_t}{m_o} \cdot 100,$$

ahol m_x a d_x szemmagysághoz tartozó, t időpontban vett minta tömege kiszáritott állapotban (g);

m_o a t_1 , időpontban vett minta tömege kiszáritott állapotban (g);

m_t a zagyban levő nátrium-pirofoszfát tömege (g).

A mértékadó eredmény legalább 2 olyan A_x eredmény átlaga, amelyek között az eltérés legfeljebb két tömegszázalék.

Teljes eredmény a mértékadó eredmény és a szemmegoszlási görbe.

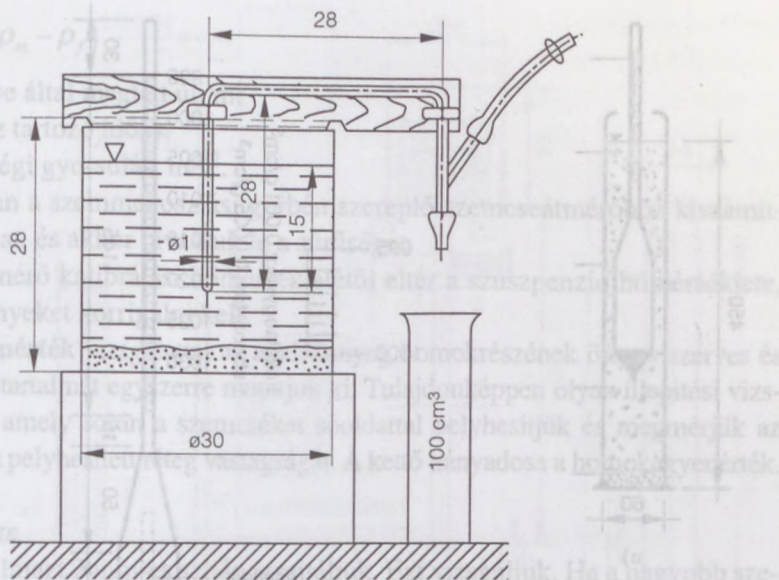
A 0,02 mm-nél kisebb szemek mennyiségének meghatározása szívócsővel

A vizsgálat lényege az, hogy a vizsgált halmaz 0,02 mm-nél kisebb részeit – a hőmérséklettől függő ülepedési sebességüknek megfelelő időpontban – különválasztjuk úgy, hogy szívócsöves készülékkel mintát veszünk és tömegarányukat bepárlás útján meghatározzuk.

A vizsgálat menete

5 kg légszáraz halmazt a készülék (2.27. ábra) tároló edényében 5 liter forrásban lévő vízzel leöntjük és 10 percig erélyesen keverjük. A pelyhesedés megakadályozására 34 g nátrium-pirofoszfátot adunk hozzá és a keveréket szobahőmérsékletű csapvízzel 17 l-re feltöltjük.

Amikor az edényben lévő zagy 16–24 °C-ra lehül, még egyszer gondosan átkeverjük. A folyadékot a vakolókanállal gyorsan nyugalomba hozzuk, elhelyezzük a szívócsövet a 2.27. ábra szerint, majd a folyadék hőmérsékletétől függően (2.14. táblázat) 1 l zagyot leszívunk.



2.27. ábra. A szívócsöves készülék a 0,02 mm-nél kisebb szemek mennyiségének a meghatározására

Majd a leszívott zagyot – 0,01 g pontosan lemért porcelántálban – elpárologtatjuk és a kiszáritott anyagot újra lemérjük.

A halmaz 0,02 mm-nél kisebb szemcséinek tömeghányada – 0,1 g pontossággal –

$$d_{0,02} = 0,34 m_a \cdot 100$$

képletből számítható, ahol

$d_{0,02}$ a 0,02 mm-nél kisebb tömeg hányada, %;

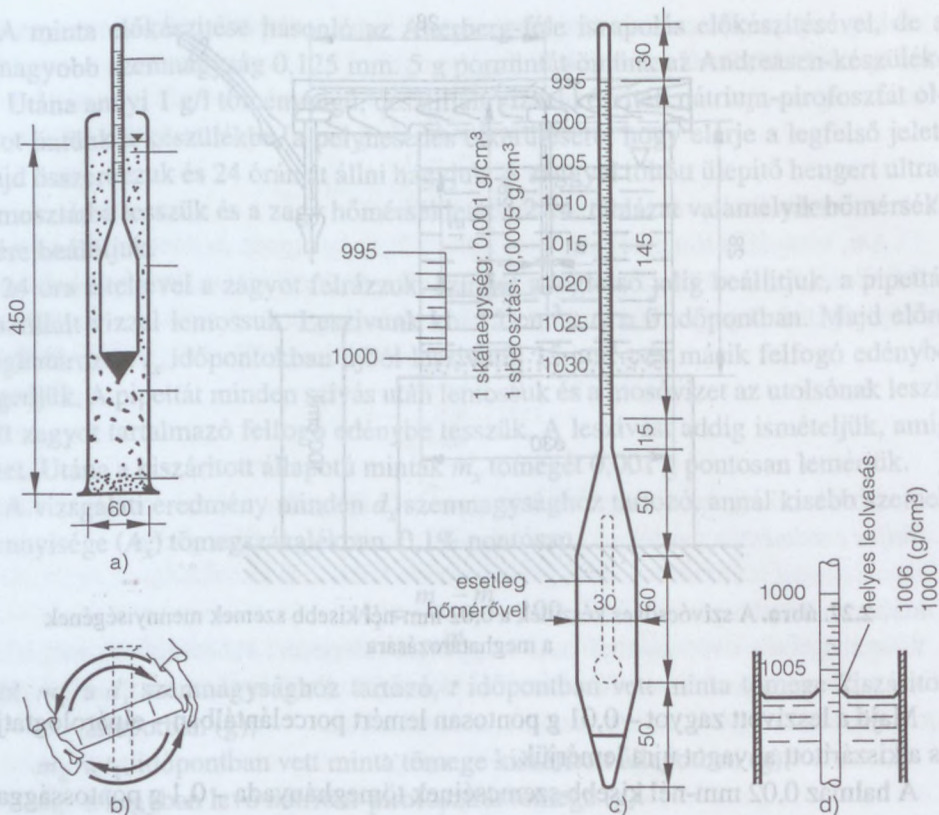
m_a az 1 l zagyban lévő finomszemek mennyisége, g;

0,34 tapasztalati állandó.

Mértékadó a két vizsgálati eredmény átlaga, ha 5%-nál kevésbé térnek el egymástól.

Hidrometrálással az adalékanyag 0,125 mm-nél kisebb részei mennyiségét határozzuk meg a zagy sűrűségének a csökkenése alapján.

A hidrometrálás során a 6 cm átmérőjű, 45 cm magas mérőhengert (2.28a ábra) 1000 cm³-ig feltöltjük a vizsgálandó szuszpenzióval, majd erős rázással az anyagot összekeverjük (2.28b ábra). A pelyhesedést 0,5–1,0 nátrium-pirofoszfát (Na₄P₂O₇·10H₂O) vagy nátronvíziüveg (Na₂SiO₃) zagyhoz adagolásával akadályozhatjuk meg. Azután az üveghengert rázkódásmentes, mozdulatlan asztalra helyezzük, a sűrűségmérőt (hidrométer vagy areométer; 2.28c ábra) azonnal a folyadékba süllyesztjük és ettől az időtől számított 1/2, 1, 2, 5, 45 perc és 2, 5, 24 óra múlva leolvassuk a sűrűségmérőn a beme-rülést. A 2 perces leolvasástól kezdve a sűrűségmérőt a leolvasás után ki kell a szuszpenzióból óvatosan emelni, a kivétel után minden esetben le kell öblíteni és meg kell mérni a szuszpenzió hőmérsékletét. A beme-rülést a 2.28d ábra szerint kell leolvasni.



2.28. ábra. Szemcseméret-eloszlás meghatározása hidrometrálással
 a) hidrometráló készülék; b) a mérőhenger mozgatása a mérés előtt;
 c) a sűrűségmérő; d) a folyadékszint helyes megállapítása

Cementhez immerziós (reakcióba nem lépő) folyadéknak abszolút alkoholt használnak.

A t időpontban a d_t -nél kisebb szemek $m\%$ -a a szuszpenzióban:

$$a = 100 \frac{\rho_{sz}}{\rho_{sz} - \rho_f} \cdot \frac{V}{m} (\rho_t - \rho_f) \quad (m\%),$$

ahol az eddig nem szereplő mennyiségek jelentése

a a szemmegoszlási görbe ordinátája, $m\%$,

ρ_t a szuszpenzió sűrűsége t időpontban kg/m^3 ,

V a szuszpenzió térfogata, m^3 ,

m a szuszpenzióban lévő szilárd anyagok tömege, kg ,

ρ_f , ill. ρ_{sz} a folyadék, ill. a vizsgált anyag sűrűsége, kg/m^3

d_t a Stokes-képletből számítható:

$$d_t = \sqrt{\frac{1}{c} \frac{h}{t}},$$

$$\text{ahol } c = \frac{1}{18\eta} g(\rho_{sz} - \rho_f)$$

h a szemcse által megtett út, m;

t a h úthoz tartozó idő, s;

g a nehézségi gyorsulás, m/s².

A gyakorlatban a szemmegoszlási görbén szereplő szemcseátmérőhöz kiszámítjuk a t időpontokat, és akkor olvassuk le a sűrűséget.

Ha a sűrűségmérő kalibrálási hőmérsékletétől eltér a szuszpenzió hőmérséklete, akkor az eredményeket korrigálni kell.

A **homokegyenérték** vizsgálattal az adalékanyag homokrészének összes szerves és szervetlen kolloidtartalmát egyszerre mutatjuk ki. Tulajdonképpen olyan ülepítési vizsgálatról van szó, amely során a szemcséket sóoldattal pelyhesítjük és megmérjük az összenyomott és a pelyhesített réteg vastagságát. A kettő hányadosa a homokegyenérték.

A vizsgálat menete

A vizsgálandó halmazt 2 mm-es szitán átszítaljuk. Ezt vizsgáljuk. Ha a nagyobb szemek porosak, sárosak, akkor ezekről a finom szemeket belemossuk a vizsgálandó homokrészbe. A vizsgálandó homokot nem szabad előzetesen kiszárítani.

Elkészítjük a pelyhesítő mérőoldatot. Ehhez 111,7 g vízmentes kalcium-kloridot 50 cm³ forró desztillált vízben feloldunk, lehűlés után szűrőpapíron átszűrjük. Majd hozzáadunk 540,2 g tiszta minőségű glicerint és 12,7 g 35%-os tiszta minőségű formaldehidet. Az oldatot kiegészítjük 1000 cm³-re és elegyítjük. Ebből az oldatból 93 cm³ desztillált vízzel 4000 cm³-re hígítunk. Ez lesz a mérőoldat.

A vizsgálati anyaggal – tömörítés nélkül – megtöltjük a 88 cm³-es mérőedényt, tetejét vonalzóval lehúzzuk. Ezt a mérőhengerbe (2.29a ábra) szórjuk, majd a 100 mm-es jelig feltöltjük mérőoldattal. A mérőhengert gumidugóval lezárjuk és kézi erővel függőleges síkban oda-vissza forgatjuk. Majd a dugót kivéve, a mosócső segítségével, mérőoldattal lemossuk a mérőhenger belső falát, ezután feltöltjük a mérőhengert a 380 mm-es jelig úgy, hogy közben a mosócső a henger aljáig ér. A mosócsövet szép lassan kihúzzuk. A folyadékszintet a 380 mm-ig beállítjuk.

20 percig állni hagyjuk a mérőhengert, majd leolvassuk a pelyhesedett zagy felső szintjét (2.29d ábra). Végül a dugattyút (2.29b ábra) lassan a mérőhengerbe engedjük (2.29e ábra), amíg fel nem fekszik, leolvassuk a h_2 értéket.

A homokegyenérték

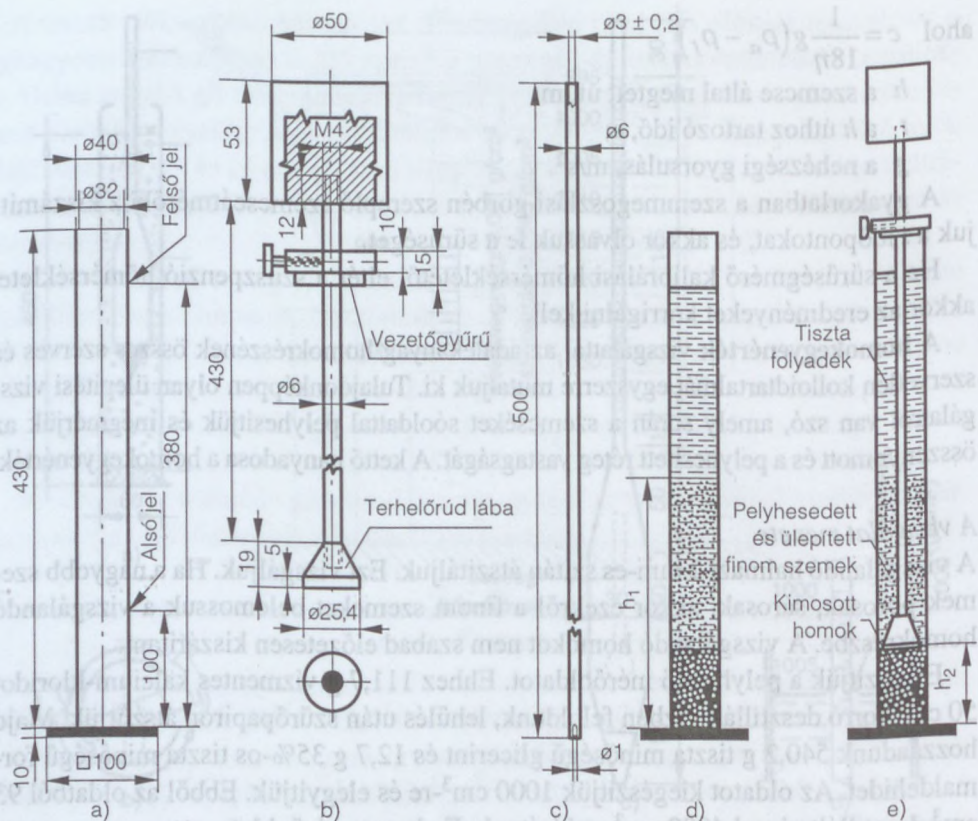
$$HE = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100,$$

ahol h_1 a zagy felső szintje, mm

h_2 a szemcsés halmaz felső szintje, mm.

A homokegyenérték két vizsgálati eredmény átlaga.

Minél közelebb van a homokegyenérték a 100-hoz, annál tisztább a homok. Ha 60-nál kisebb, akkor az a homok a beton tulajdonságait már lényegesen rontja.



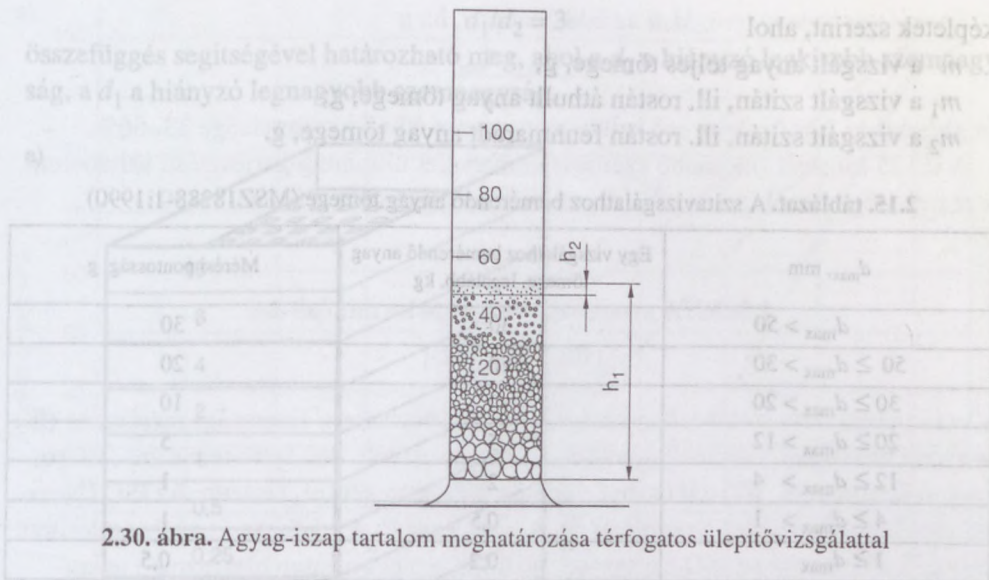
2.29. ábra. Homokegyenérték vizsgálati eszközei és a vizsgálat

- a) átlátszó talpas mérőhenger; b) terhelő dugattyú és központosító berendezés;
 c) 500 mm hosszú réz mosócső; d) mérőedény, amelyen a zagy felső szintje leolvasható;
 e) mérőhenger a beleengedett dugattyúval

A munkahelyen azonban legtöbbször kielégítő az **agyag- és iszaptartalom meghatározása térfogatos ülepitővizsgálattal**. A vizsgálat során a ki nem szárított, természetes állapotú adalékkeverékből tiszta csapvízzel a 4 mm alatti adalékrészbe mossuk az összes finom szemcsét. A mosóvizet ülepitjük, ha kitisztult leöntjük és a teljes maradékot (4 mm-nél kisebb szemcsék és a mosóvíz zagyszerű része) 1 literes – becsiszolt üvegdugóval ellátott – menzurába öntjük úgy, hogy a magasság felét töltsé ki, majd a 1000 cm³-es jelig ivóvízzel feltöltjük. A menzurát vízszintes tartásban igen alaposan összerázzuk. 20, 40 és 60 perc elteltével a zagyot újra felrázzuk, hogy közben a tapadó finom szemcsék kioldódjanak, majd 24 órás függőleges tárolás után leolvassuk a teljes (h_1) és az agyag-iszap vastagságát (h_2). A közelítő agyag-iszap mennyisége (2.30. ábra):

$$i(V\%) = 100 \cdot \frac{h_2}{h_1}$$

Az így meghatározott i V% agyag-iszap közelítően 0,5 i m%-nak felel meg.



2.30. ábra. Agyag-iszap tartalom meghatározása térfogatos ülepitővizsgálattal

2.3.3. Szemszerkezeti vizsgálatok

2.3.3.1. A szemmegoszlási görbe

(MSZ 18288-1)

A szemmegoszlási görbét szitavizsgálattal állapítjuk meg. A szabványos szita-, ill. rostasorozat a következő részekből áll: az alsó tálca (amely a legsűrűbb szitán áthulló szemek felfogására szolgál), 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; és 1 mm lyukbőségű, huzalszövetű szitasor, továbbá a 2; 4; 8; 12; 16; 24; 32 mm lyukbőségű négyzetlyukú rostasor (2.31a ábra).

Az egy vizsgálathoz szükséges anyag mennyiségét a 2.15. táblázat tartalmazza. A vizsgált halmazból a véletlen mintavétel elve alapján vesszük a mintát, ebből összekeverés és negyedelés útján állítjuk elő a vizsgált mennyiséget. A szita-, ill. rostasor lehet 20–50 cm átmérőjű kör alakú vagy 20–50 cm oldalméretű négyzet alakú.

A vizsgált adalékanyag légszáras, szikkasztott vagy kiszáritott lehet. Azután a vizsgálatra kimért adalékanyagot a szita-, ill. a rostasorozat alulról felfelé növekvő lyukbőségű felső tagjára ráöntjük és vízszintes mozzgatással vagy vibrálással addig rostáljuk, amíg már semmi sem hull át. Ezt minden egyes szita-, ill. rostaelemmel elvégezzük. A vizsgálati jegyzőkönyvben meg kell adni a szitákon, ill. rostákon fennmaradt (b), illetve áthullt (a) anyagot $m\%$ -ban az egész anyaghoz viszonyítva

$$a = 100 \frac{m_1}{m} (m\%),$$

$$b = 100 \frac{m_2}{m} (m\%)$$

képletek szerint, ahol

m a vizsgált anyag teljes tömege, g;

m_1 a vizsgált szitán, ill. rostán áthullt anyag tömege, g;

m_2 a vizsgált szitán, ill. rostán fennmaradt anyag tömege, g.

2.15. táblázat. A szitavizsgálathoz bemérendő anyag tömege (MSZ18288-1:1990)

d_{\max} , mm	Egy vizsgálathoz bemérendő anyag tömege, legalább, kg	Mérési pontosság, g
$d_{\max} > 50$	30	30
$50 \geq d_{\max} > 30$	20	20
$30 \geq d_{\max} > 20$	7	10
$20 \geq d_{\max} > 12$	5	5
$12 \geq d_{\max} > 4$	2	1
$4 \geq d_{\max} > 1$	0,5	1
$1 \geq d_{\max}$	0,2	0,5

Az osztályozás lehet vizes is, ebben az esetben az egyes szitákon, ill. rostákon vízsugárral mossuk át az áthulló részt. Vizes osztályozással a 0,063-nál finomabb részek mennyiségét is meg lehet határozni, míg a száraz osztályozás csak 0,125 mm-ig megbízható. Az anyag tömegét mindig kiszárított állapotban mérjük.

A vizsgálat eredményét a szemmegoszlási görbében ábrázoljuk (2.31b ábra). Az ordinátán az áthullt összes tömeget százalékban, az abszcisszán pedig a szita, ill. a rosta lyukbőségét mm-ben, log. léptékben tüntettük fel. Ha az adalékanyag különböző testsűrűségű szemek keveréke, akkor az ordinátán az összes áthullott szem térfogat-százalékát kell feltüntetni.

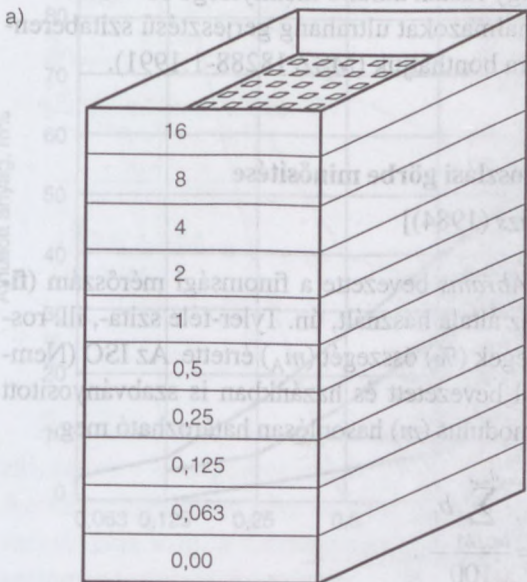
A szemmegoszlási görbe jellemzői: *legnagyobb szemnagyság* (d_{\max}) annak a szabványos rostának a lyukbősége (mm), amelyen legfeljebb 5 m% marad fenn az adalékanyag vizsgálata során. A legnagyobb szemnagyság lehetőleg ne legyen nagyobb, mint a betonozandó szerkezet legkisebb vastagságának a harmada, vízzáró betonszerkezetek esetében egynegyede, ill. az acélbetétek egymás közti távolsága. *Legkisebb szemnagyság* (d_{\min}) annak a szabványos szitának a lyukbősége, amelyen a vizsgálat során legfeljebb adott tömegszázalék esik át. Ha a 0,063 mm lyukbőségű szitán 5 m%-nál kevesebb esik át, akkor $d_{\min} = 0$.

Frakcióélesség mérőszáma (m%) a frakcióhatárokon kívül eső adalékanyag mennyisége.

Folyamatos szemmegoszlásúnak az olyan adalékanyagot nevezik, amely a legnagyobb szemnagyságig minden szemnagyságot tartalmaz.

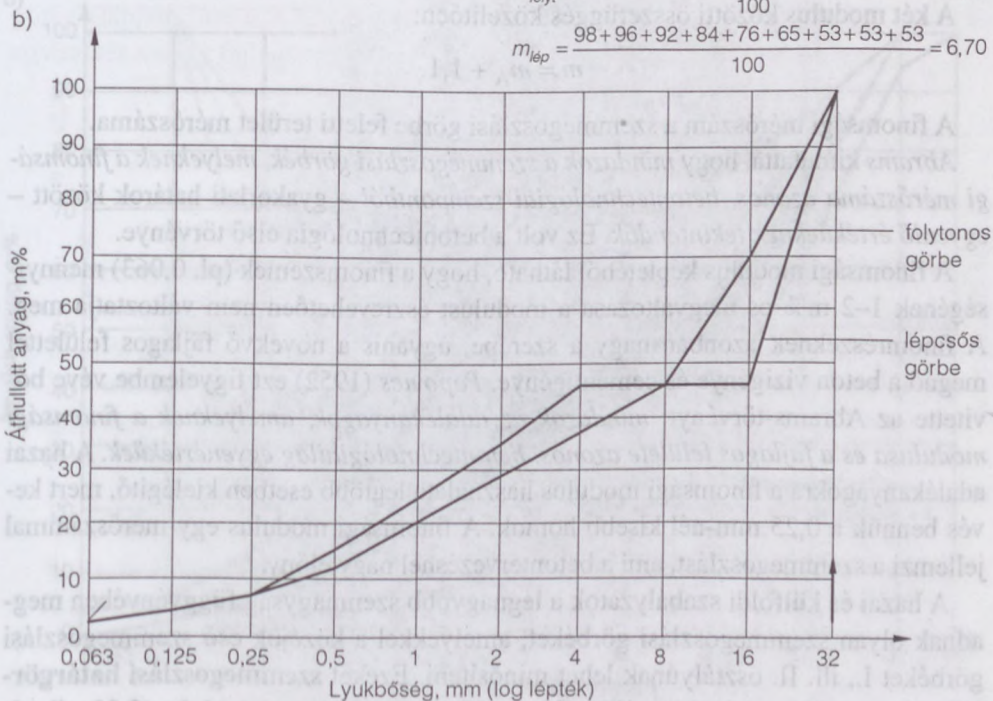
Lépcsős szemmegoszlású az olyan adalékanyag, amelyből néhány frakció hiányzik. A lépcső $d_{\max}/2$ és 1 mm között lehet. A fenti két határ között a lépcső célszerű terjedelme:

összefüggés segítségével határozható meg, ahol a d_2 a hiányzó legkisebb szemnagyság, a d_1 a hiányzó legnagyobb szemnagyság.



$$m_{\text{folyt}} = \frac{98 + 96 + 92 + 88 + 79 + 71 + 63 + 53 + 30}{100} = 6,70$$

$$m_{\text{lép}} = \frac{98 + 96 + 92 + 84 + 76 + 65 + 53 + 53 + 53}{100} = 6,70$$



2.31. ábra. A szemmegoszlás vizsgálata
a) szabványos szitator; b) szemmegoszlási görbe

Egyenletes szemmegoszlású az adalékanyag, ha a

$$\frac{d_{\max} + d_{\min}}{2}$$

lyukbőséghez legközelebb eső szítán vagy rostán áthulló mennyisége 33–66%.

A 0,125 mm-nél finomabb szemcsehalmazokat ultrahang gerjesztésű szitaberendezéssel még tetszőleges részhalmazokra bonthatjuk (MSZ 18288-1:1991).

2.3.3.2. A szemmegoszlási görbe minősítése

[Balázs (1984)]

A szemmegoszlási görbe jellemzésére Abrams bevezette a finomsági mérőszám (**finomsági modulus**) fogalmát, amelyen az általa használt, ún. Tyler-féle szita-, ill. rostasoron fennmaradt, 100-zal osztott tömegek (%) összegét (m_A) értette. Az ISO (Nemzetközi Szabványosítási Szervezet) által bevezetett és hazánkban is szabványosított szita-, ill. rostasoron az ISO-finomsági modulus (m) hasonlóan határozható meg.

$$m = \frac{\sum_{i=0,063}^{d_{\max}} b_i}{100}$$

A két modulus közötti összefüggés közelítően:

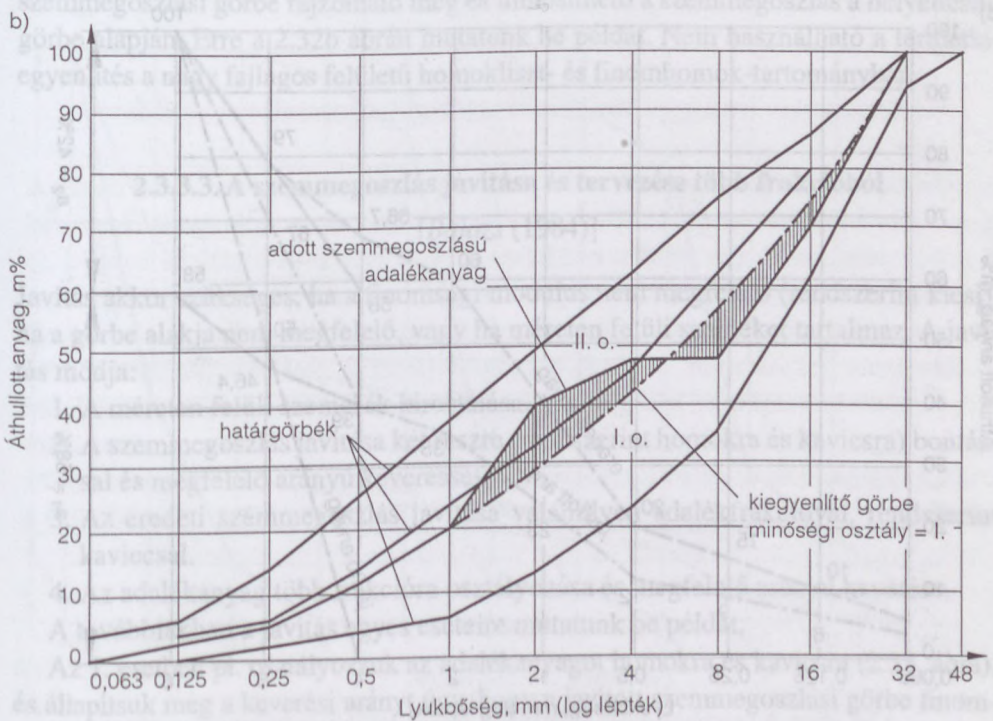
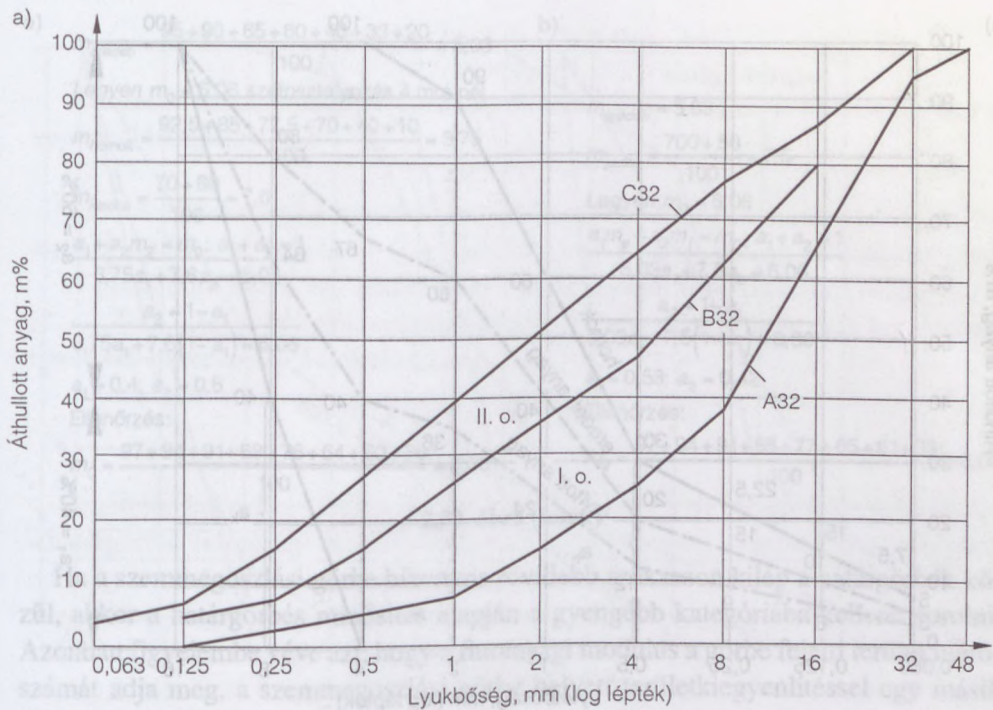
$$m = m_A + 1,1.$$

A finomsági mérőszám a szemmegoszlási görbe feletti terület mérőszáma.

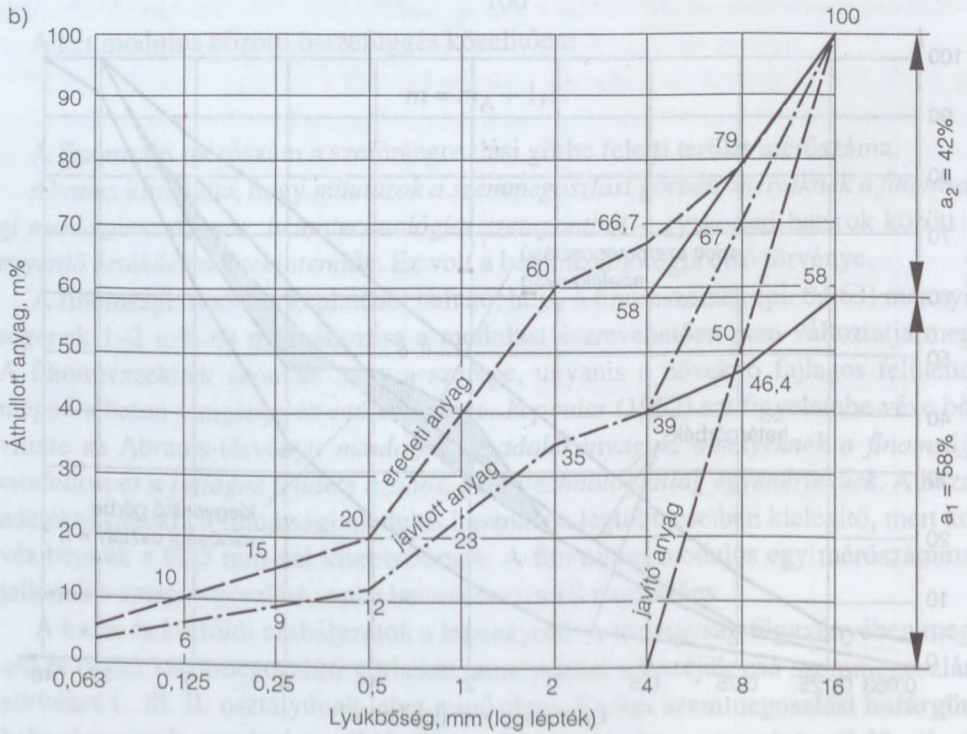
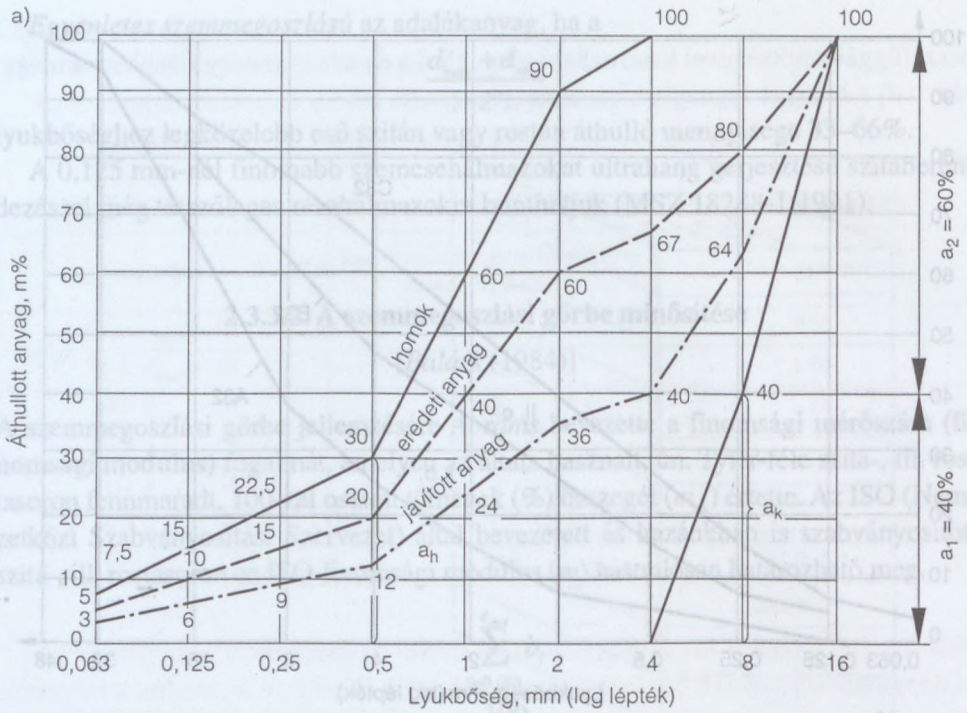
Abrams kimutatta, hogy *mindazok a szemmegoszlási görbék, melyeknek a finomsági mérőszáma azonos, betontechnológiai szempontból* – gyakorlati határok között – *egyenlő értékűeknek tekintendők.* Ez volt a betontechnológia első törvénye.

A finomsági modulus képletéből látható, hogy a finomszemek (pl. 0,063) mennyiségének 1–2 m%-os megváltozása a modulust észrevehetően nem változtatja meg. A finomrészeknek azonban nagy a szerepe, ugyanis a növekvő fajlagos felülettel megnő a beton vízigénye és cementigénye. Popovics (1952) ezt figyelembe véve bővítette az Abrams-törvényt: *mindazok az adalékanyagok, amelyeknek a finomsági modulusa és a fajlagos felülete azonos, betontechnológiailag egyenértékűek.* A hazai adalékanyagokra a finomsági modulus használata legtöbb esetben kielégítő, mert kevés bennük a 0,25 mm-nél kisebb homok. A finomsági modulus egy mérőszámmal jellemzi a szemmegoszlást, ami a betontervezésnél nagy előny.

A hazai és külföldi szabályzatok a legnagyobb szemnagyság függvényében megadnak olyan szemmegoszlási görbéket, amelyekkel a közéjük eső szemmegoszlási görbéket I., ill. II. osztályúnak lehet minősíteni. Ezeket **szemmegoszlási határgörbéknek** nevezik, amelyekre például $d_{\max} = 32$ mm esetére mutatunk be (2.32a ábra).



2.32. ábra. Szemmegoszlási határgörbék $d_{\max} = 32$ mm esetére;
 b) a szemmegoszlási görbe minősítése területkiegénylítéssel



2.33. ábra. A szemmegoszlás javítása két frakcióból a) homokra és kavicsra bontással, b) javító anyag felhasználásával

a)

$$m_{eredeti} = \frac{95+90+85+60+40+33+20}{100} = 5,03$$

Legyen $m_0 = 6,06$ szétosztályozás 4 mm-nél

$$m_{homok} = \frac{92,5+85+77,5+70+40+10}{100} = 3,75$$

$$m_{kavics} = \frac{70+60}{100} = 7,6$$

$$a_1 + a_2 m_2 = m_0; a_1 + a_2 = 1$$

$$3,75a_1 + 7,6a_2 = 6,06$$

$$a_2 = 1 - a_1$$

$$3,75a_1 + 7,6(1 - a_1) = 6,06$$

$$a_1 = 0,4; a_2 = 0,6$$

Ellenőrzés:

$$m_0 = \frac{97+94+91+88+76+64+60+36}{100} = 6,06$$

b)

$$m_{eredeti} = 5,03$$

$$m_{javító} = \frac{700+50}{100} = 7,5$$

Legyen $m_0 = 6,06$

$$a_1 m_e + a_2 m_j = m_0; a_1 + a_2 = 1$$

$$5,03a_1 + 7,5a_2 = 6,06$$

$$a_2 = 1 - a_1$$

$$5,03a_1 + 7,5(1 - a_1) = 6,06$$

$$a_1 = 0,58; a_2 = 0,42$$

Ellenőrzés:

$$m_0 = \frac{97+94+91+88+77+65+61+33}{100} = 6,06$$

2.33. ábra (folyt.)

Ha a szemmegoszlási görbe bizonyos rövidebb szakaszon kilép a határgörbék közül, akkor a határgörbés minősítés alapján a gyengébb kategóriába kellene sorolni. Azonban figyelembe véve azt, hogy a finomsági modulus a görbe feletti terület mérőszámát adja meg, a szemmegoszlási görbe helyett területkiegénylítéssel egy másik szemmegoszlási görbe rajzolható meg és minősíthető a szemmegoszlás a helyettesítő görbe alapján. Erre a 2.32b ábrán mutatunk be példát. Nem használható a területkiegénylítés a nagy fajlagos felületű homokliszt- és finomhomok-tartományban.

2.3.3.3. A szemmegoszlás javítása és tervezése több frakcióból

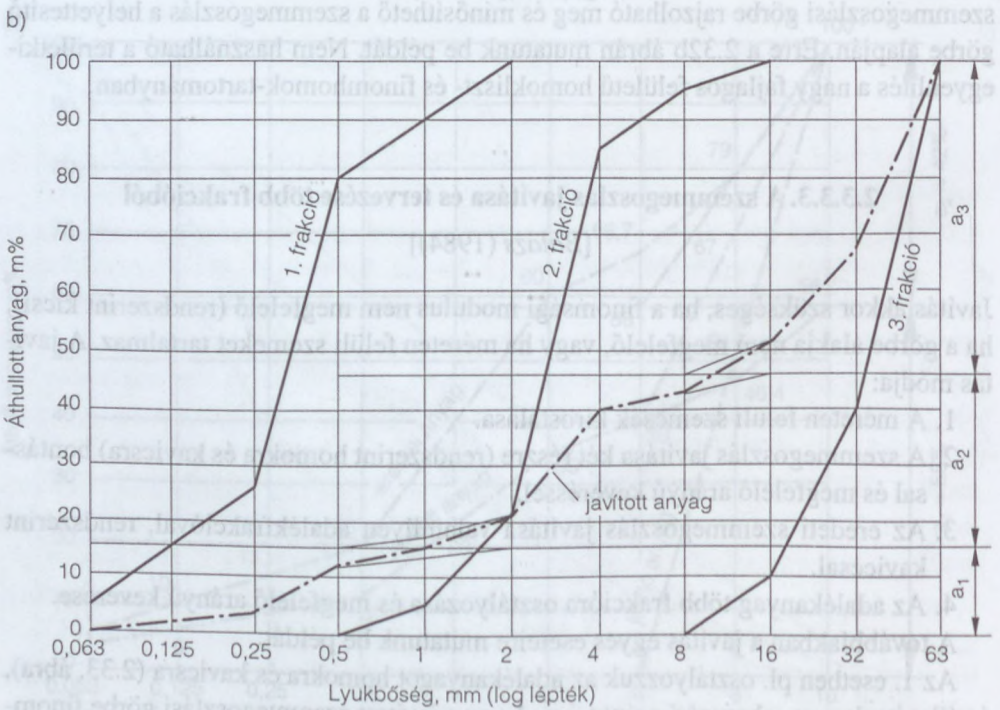
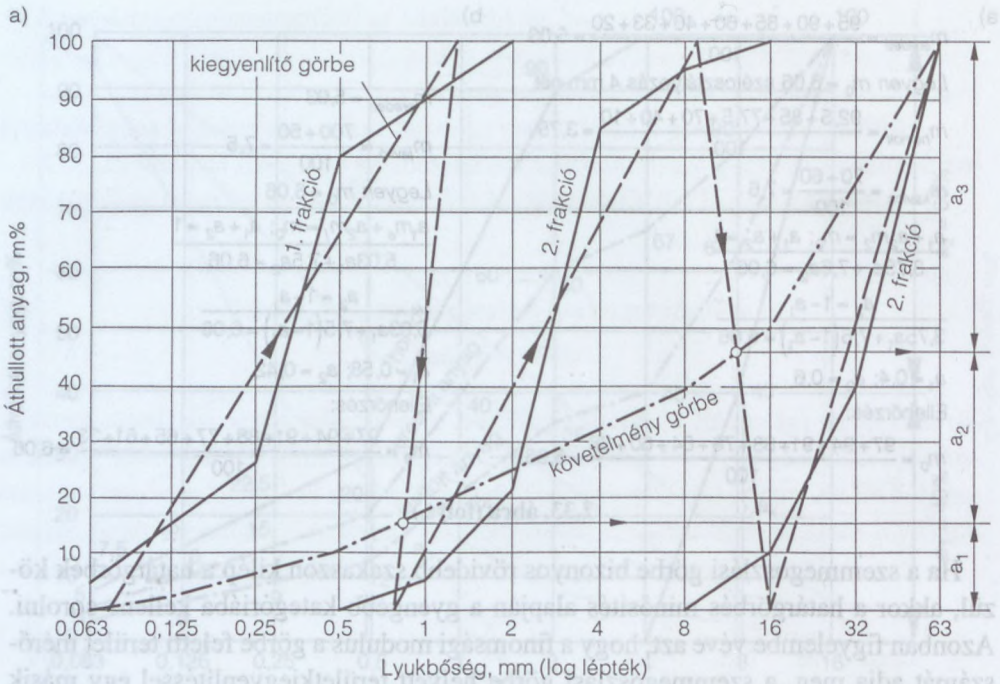
[Balázs (1984)]

Javítás akkor szükséges, ha a finomsági modulus nem megfelelő (rendszerint kicsi), ha a görbe alakja nem megfelelő, vagy ha méreten felüli szemeket tartalmaz. A javítás módja:

1. A méreten felüli szemcsék kiostálása.
2. A szemmegoszlás javítása két részre (rendszerint homokra és kavicsra) bontással és megfelelő arányú keveréssel.
3. Az eredeti szemmegoszlás javítása valamilyen adalékfrakcióval, rendszerint kavicsal.
4. Az adalékanyag több frakcióra osztályozása és megfelelő arányú keverése.

A továbbiakban a javítás egyes eseteire mutatunk be példát.

Az 1. esetben pl. osztályozzuk az adalékanyagot homokra és kavicsra (2.33. ábra), és állapítsuk meg a keverési arányt úgy, hogy a javított szemmegoszlási görbe finomsági mérőszáma m_0 legyen. Külön megállapítjuk a homok (m_h) és a kavics (m_k) finomsági mérőszámát és az a_1 , ill. a_2 keverési arányt az alábbi egyenletből számíthatjuk:



2.34. ábra. A szemmegoszlás tervezése 3 átfedő frakcióból való szerkesztéssel
 a) a keverési arányok megállapítása; b) a követelménygörbét legjobban megközelítő görbe előállítása adott frakciókból

$$a_1 \cdot m_h + a_2 \cdot m_k = m_0, \quad m_0 = d$$

$$a_1 + a_2 = 1.$$

A keresett szemmegoszlási görbe a_0 áthullt tömegszázalék értékeit a következő képletből kaphatjuk meg:

$$a_1 \cdot a_h + a_2 \cdot a_k = a_0.$$

Hasonlóan számítjuk a keverési arányt a 2. esetben is (2.33b ábra), csak m_h helyett m_e (e = eredeti), m_k helyett m_j (j = javító) finomsági modulusokat kell helyettesíteni.

A gyakorlati esetek egy részében az adalékanyagot több frakcióra osztályozzuk (2.34. ábra), ezek a frakciók egymást átfedik. Ebben az esetben is csak két egyenlet írható fel, nevezetesen 3 frakció esetén

$$a_1 \cdot m_1 + a_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot m_3 = m_0$$

$$a_1 + a_2 + a_3 = 1.$$

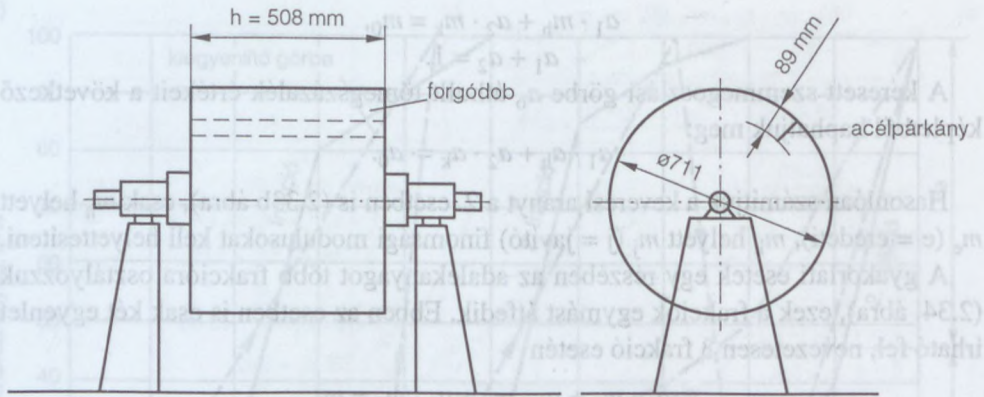
A három ismeretlen közül egyet fel kell vennünk. Pl. a_1 felvehető úgy, hogy m_0 -t a határgörbék finomsági modulusaihoz vagy a *Palotás* által javasolt legkedvezőbb finomsági modulusához hasonlítjuk. A követelménygörbét (finomsági modulusa m_0) felrajzoljuk és a 2.34a ábra szerint megszerkesztjük a_1, a_2, a_3 értékét. Utána felrajzoljuk a követelménygörbét legjobban megközelítő szemmegoszlási görbét (javított anyag, 2.34b ábra). Végül ellenőrizzük ennek a finomsági modulusát. Ez valószínűen egyezik m_0 -lal. Ha nem egyezik, akkor arányosan eltoljuk a javított görbét.

2.3.4. Adalékanyag-halmazok szilárdságának vizsgálata

A zúzott adalékanyag szilárdságát egyes esetekben nem lehet szabályos próbatesten meghatározni, mert nincs adalékközet, amelyből a próbatestet kifűrészelhetnénk, pl. könnyű adalékanyagok esetén. Más esetekben a közet repedezett, rétegződött és nem is lehet szabályos próbatestet kivágni, vagy ha lehet is, nagy a szilárdság szórása. Ezenkívül az egyes adalékszemcsék viselkedése a terhelés hatására függ a szemcsék felületétől, alakjától is. Ezért dolgoztak ki olyan módszereket, amelyekkel a halmazok szilárdságát modellezni lehet. Két vizsgálati alaptípust különböztetünk meg, nevezetesen a dinamikus és a statikus vizsgálatot. A dinamikus vizsgálatok közül ismertetjük a Los Angeles- és a vizes mikro-Deval-, a statikus vizsgálatok közül a Hummel típusú vizsgálatot.

2.3.4.1. Los Angeles-vizsgálat

A Los Angeles-vizsgálat a kavics, ill. a zúzottkő halmaz aprózódási veszteségének a meghatározására szolgál. A vizsgálatot a 2.35. ábra szerinti dobozban végezzük. A doboz belül sugárirányú acélpárkányok vannak.



2.35. ábra. A Los Angeles-dob

Az egyes frakciókból vizsgálandó (véletlen próbavétel elve alapján vett, kiszáritott) anyag tömegét, a vizsgálandó anyaggal a dobba helyezett acélgolyók számát és tömegét, valamint az összes fordulatszámát a 2.16. táblázat tartalmazza.

Az aprózódás egyrészt a súrlódás miatt következik be, másrészt amiatt, hogy a hengerbe épített acélpárkány a mintaanyagot és az acélgolyókat felemeli, majd leejti. A Los Angeles-aprózódás (a_{LA}) a bemért minta (m) és a vizsgálat után az 1,6 mm-es szitán fennmaradt minta (m_a) tömegéből a következőképpen számítható:

$$a_{LA} = \frac{m - m_a}{m} \cdot 100.$$

Frakciónként két vizsgálatot kell végezni és ezek eredményének átlagát tekintjük aprózódási veszteségnek.

A vizsgálat elvégezhető természetes állapotú, ill. időállósági próbának kitett adalékanyag halmazon.

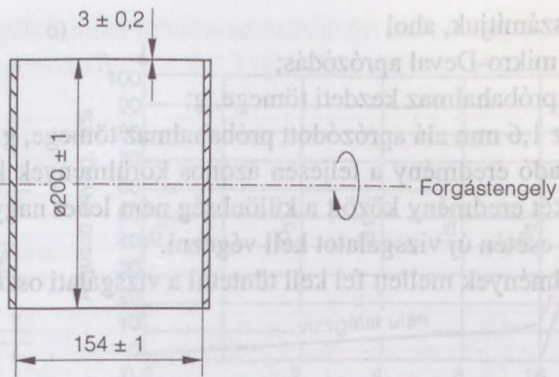
2.3.4.2. Mikro-Deval-vizsgálat

(MSZ 18287/6–84)

A vizsgálat célja a 2.36. ábrán feltüntetett dobben a mikro-Deval-aprózódás meghatározása.

A vizsgálat a 2.16. táblázat szerinti 10 vizsgálati osztályban végezhető el. Az alkalmazandó vizsgálati osztályt a termékszabvány vagy a vizsgálati terv (MSZ 18282/1-3) írja elő.

A vizsgálatot a 2.36. ábra szerinti dobben végezzük. Forgási sebessége 100 ± 10 ford/perc. A dob fedelének a vastagsága $8 \pm 0,3$ mm, melyet gumigyűrűk és szorítócsavarok segítségével vízmentesen lehet zárni. A vizsgálathoz rozsdamentes, $10^{+0,1}_{-0,5}$ mm átmérőjű acélgolyókat használunk.



2.36. ábra. A mikro-Deval-dob

2.16. táblázat. Vizsgálati osztályok és a golyók tömege dobonként a mikro-Deval-vizsgálathoz

Vizsgálati osztály	Szemnagyság, mm	Golyók tömege dobonként, g
I.	2/4	500
II.	3/5	1000
III.	4/8	2500
IV.	5/8	3000
V.	5/12	4000
VI.	8/12	4500
VII.	5/20	5000
VIII.	8/16	5000
IX.	12/16	5500
X.	12/20	6000

A vizsgálat lehet vizes vagy száraz. A szemnagyságnak megfelelő szitákon a szükséges mennyiségű halmazt átmoszuk, majd 105 ± 5 °C hőmérsékleten kiszárítjuk és ebből 500 ± 2 g tömegű próbahalmazt veszünk.

A próbahalmazt és a vizsgálati osztálynak megfelelő golyókat a dobba helyezük. A fedelet lezárjuk. A dobot 12000 fordulattal megforgatjuk. Ezután a dobot felnyitjuk. Az acélgolyókat mágnessel vagy szitán eltávolítjuk, majd az aprózódott próbahalmazt 1,6 mm-es szitán vízzel átmoszuk, a szitán fennmaradt aprózódott halmazt 105 ± 5 °C hőmérsékleten kiszárítjuk, végül exsikkátorban szobahőmérsékletre lehűtjük és lemérjük (m_a).

A vizes vizsgálat annyiban tér el az ismertetett vizsgálattól, hogy a próbahalmazokhoz dobonként 2500 ± 10 cm³ csapvizet öntünk.

A mikro-Deval-aprózódást a

$$a_{mD} = \frac{m - m_a}{m} \cdot 100$$

képletből számítjuk, ahol

a_{mD} a mikro-Deval aprózódás;

m a próbahalmaz kezdeti tömege, g;

$m-m_a$ az 1,6 mm alá aprózódott próbahalmaz tömege, g.

Mértékadó eredmény a teljesen azonos körülmények között kapott 2 eredmény átlaga. A két eredmény között a különbség nem lehet nagyobb 2 m%-nál. Nagyobb különbség esetén új vizsgálatot kell végezni.

Az eredmények mellett fel kell tüntetni a vizsgálati osztályt is.

2.3.4.3. Hummel szétaprózódási vizsgálat

Lényege, hogy a 2.37a ábra szerinti acélmozsárba 2 liternyi halmaztérfogatnak megfelelő adalékanyagot mérünk be, és azt a felület elegyengetése után, a dugattyú közvetítésével, 1,5 perc alatt 400 kN nyomóerőnek tesszük ki, majd azonnal tehermentesítjük. A szétmorzsolódási tényező az eredeti alaphalmaz és a vizsgálatnak kitett halmaz 0,5 mm-től számított finomsági modulusának a különbsége. A finomsági modulusát a 2.37b ábra szerinti szitasoron kell értelmezni.

Az MSZ 18287/3 szabvány kétféle alaphalmaz vizsgálatát írja le, nevezetesen a 16/40 mm-es alaphalmazét, amelyet 16/24, 24/32 és 32/40 mm-es frakciókból egyenlő arányban kell összeállítani és az 5/8 mm-es alaphalmazét. A szétmorzsolódási tényező az első esetben

$$H = m_1 - m_2$$

képletből számítható, ahol

H a Hummel szerinti szétmorzsolódási tényező,

m_1 a 2.37b ábra szerint számított finomsági modulus a vizsgálat előtt,

m_2 a vizsgálat után.

A vizsgálatot természetes és időállósági próbának kitett légszáras halmazon egyaránt el lehet végezni. Könnyű adalékalmazok fontos szilárdságvizsgálati módja.

2.3.4.4. Halmazszilárdság vizsgálata

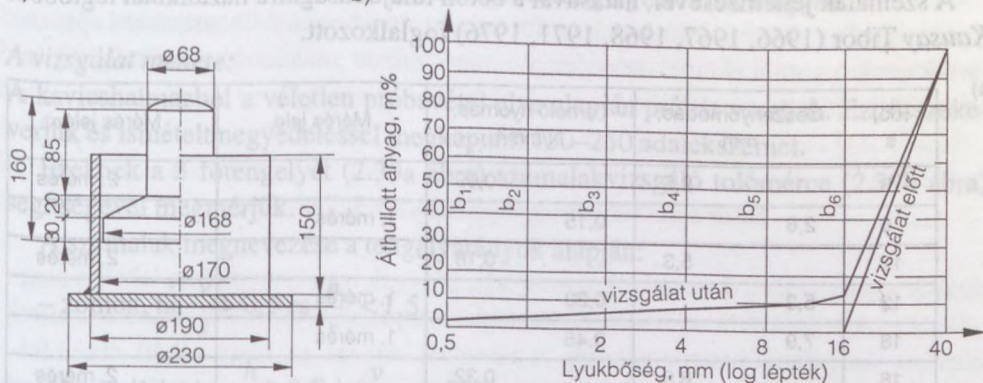
Könnyű adalékanyagok vizsgálati módszere az MSZ EN 13055-1:2003 szerint.

A mérés célja egy 113 mm belső átmérőjű edényben a 20 mm-es összenyomódáshoz szükséges erő, ill. a hozzá tartozó terhelő nyomás meghatározása.

A vizsgálati anyag 4/8 és 8/16 mm-es frakció.

A nyomó eszköz $\varnothing 113 \pm 0,1$ mm belső átmérőjű, 100 mm belső magasságú hengerből, a hengerre illeszkedő vezető gyűrűből, nyomódugóból, magasságot beállító gyűrűből és alaplapból áll. Vizsgáló eszköz még egy 3000/perc rezgésszámú, 0,5 amplitúdójú rázóasztal.

a) b)



2.37. ábra. Adalékanyagok szilárdságának Hummel szerinti vizsgálata
a) acélmozsár; b) a szétaprózódási tényező számítása

A vizsgálat során a mintát szárítoszekrényben $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ hőmérsékleten tömegállandóságig kiszárítjuk, majd hagyjuk, hogy laboratóriumi levegőn $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ hőmérsékletűre hűljön.

A hengert csordultig, szétosztályozódás mentesen megtöltjük a vizsgálati anyaggal, majd 3–60 másodperc közötti ideig vibráljuk. Az összerázódott vizsgálati anyagot pótoljuk, és a hengert újból 3–60 másodperc közötti ideig vibráljuk.

A vezető gyűrűt és a nyomódugót óvatosan a hengerre illesztjük. A magasságbeállító gyűrűt úgy állítjuk be, hogy a magasságbeállító gyűrű és a vezető gyűrű felső éle közötti távolság 20 mm legyen.

A nyomóeszközt a szilárdságvizsgáló gépbe helyezzük. A nyomógép nyomóerejét úgy kell növelni, hogy a vizsgálati anyag mintegy 100 másodperc alatt nyomódjék össze 20 mm-rel.

2.1. példa. A feladat 4/8 mm szemnagyságú bontotttégla-törmelék halmazszilárdságának a meghatározása.

A két mérés eredményét a 2.38a ábrán tüntettük fel. Ebből szerkesztettük a 2.38b ábrát.

A 20 mm összenyomódáshoz tartozó terhelő nyomás, azaz a 4/8 mm szemnagyságú téglatörmelék halmazszilárdsága $1,52 \text{ N/mm}^2$.

2.3.5. A szemalak és vizsgálata

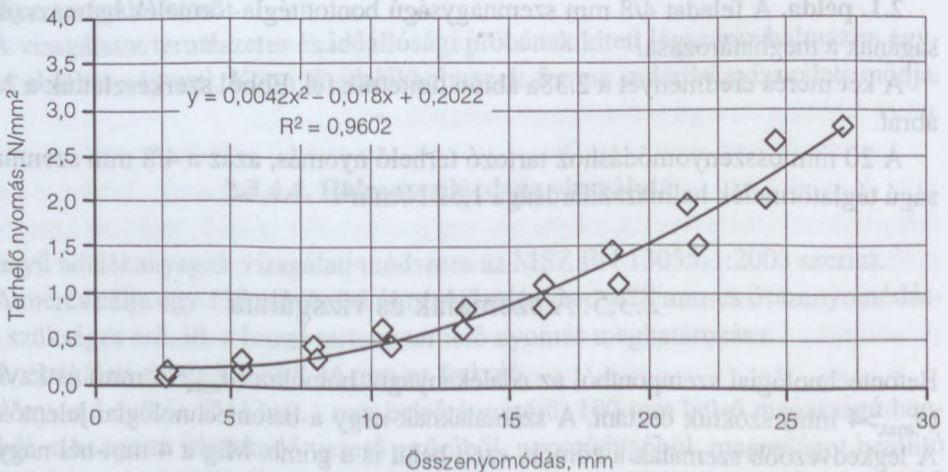
Betontechnológiai szempontból az adalékanyagot homokra ($d_{\max} \leq 4 \text{ mm}$) és kavicsra ($d_{\max} > 4 \text{ mm}$) szoktuk osztani. A szemalaknak nagy a betontechnológiai jelentősége. A legkedvezőbb szemalak a zömök, ezen belül is a gömb. Míg a 4 mm-nél nagyobb szemek alakját lehet jellemezni a szemcsék tengelyméretének a hányadosa alapján, addig a homokok szemmegoszlása a tölcsérből való kifolyási idővel jellemezhető.

A szemalak jellemzésével, hatásával a beton tulajdonságaira hazánkban legtöbbet **Kausay Tibor** (1966, 1967, 1968, 1971, 1976) foglalkozott.

a)

Idő, s	Összenyomódás, mm	Terhelő nyomás, N/mm ²	Mérés jele	Mérés jele
6	2,5	0,09		2. mérés
6	2,6	0,15	1. mérés	
12	5,3	0,18		2. mérés
12	5,3	0,30	1. mérés	
18	7,9	0,45	1. mérés	
18	8,0	0,32		2. mérés
24	10,4	0,63	1. mérés	
24	10,7	0,45		2. mérés
30	13,3	0,63		2. mérés
30	13,4	0,84	1. mérés	
36	16,2	0,84		2. mérés
36	16,2	1,10	1. mérés	
42	18,7	1,46	1. mérés	
42	18,9	1,10		2. mérés
48	21,4	1,96	1. mérés	
48	21,8	1,52		2. mérés
54	24,2	2,02		2. mérés
54	24,6	2,65	1. mérés	
60	27,0	2,81		2. mérés

b)



2.38. ábra. A 4/8 mm szemmagyságú téglatörmelék halmazszilárdsága.

a) a halmazszilárdság-mérés eredményei; b) az összenyomódás-terhelő nyomás diagram

2.3.5.1. A szemalak jellemzése a tengelyméretek alapján

A vizsgálat menete:

A kavicsalmazból a véletlen próbavétel elve alapján próbát veszünk. Ezt összekeverjük és ismételt negyedeléssel megkapunk 150–250 adalékszemet.

Ezeknek a 3 főtengelyét (2.39a ábra) szemalakovizsgáló tolmérce (2.39b ábra) segítségével megmérjük.

A szemalak megnevezése a tengelyarányok alapján:

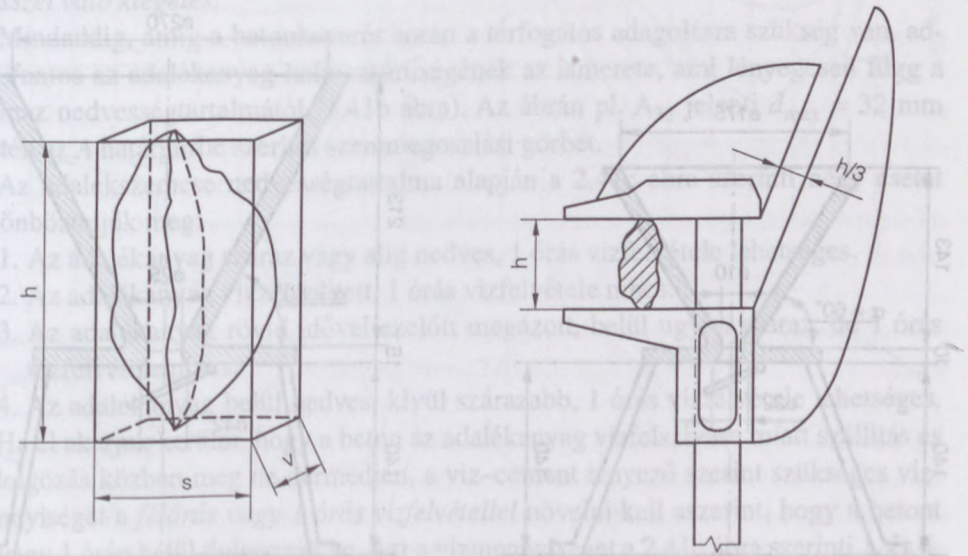
– zömök, ha $\frac{v}{s} > 0,5$ és $\frac{h}{s} < 1,5$,

– hosszúkás, ha $\frac{h}{s} \geq 0,5$ és $\frac{v}{s} > 1,5$,

– lemezes, ha $\frac{v}{s} \leq 0,5$ és $\frac{h}{s} < 1,5$,

– lemezes és hosszúkás, ha $\frac{v}{s} \leq 0,5$ és $\frac{h}{s} \geq 1,5$.

Hazánkban a szemalakat a $h/v = 3$ határérték szerint csoportosítjuk. Eszerint zömök alakúak az $1 \leq h/v \leq 3$ viszonyszámú és lemezes alakúak a $h/v > 3,0$ viszonyszámú szemek.



2.39. ábra. A szemalak tengelyeinek mérése

a) a szemalak fő méretei; b) a szemalak vizsgálata tolmérővel

- a leghosszabb tengely a hosszúság (h),
- a legrövidebb tengely a vastagság (v),
- a közbülső tengely a szélesség (s)

Minél inkább lemezes az adalékszem, annál nagyobb lesz a tömör betonhoz szükséges pépigény, és nő a bedolgozásra fordítandó munkaigény. Természetes aprózódású kvarckavicsra a zömök szemalak jellemző. Zúzott adalékanyag szemalakját lehet szabályozni a törés módjával.

2.3.5.2. A homok szemalakjának jellemzése

Homok szemalakját a főteingelyek mérése alapján csak igen bonyolultan lehetne meghatározni. A jellemzésre a kifolyási számot használjuk, melyet MSZ 18288/3 szerinti tölcéses vizsgálattal határozzunk meg. A vizsgálat lényege az, hogy a 2.40. ábrán feltüntetett készülékbe adott tömegű (ha $d_{\max} < 1$ mm 500 g, ha $d_{\max} = 1-4$ mm, akkor 3000 g) kiszáritott homokfrakció-mintát helyezünk és megmérjük a kifolyáshoz szükséges időt. A kifolyási számot a

$$k = \frac{t \cdot \rho}{m} \cdot 1000$$

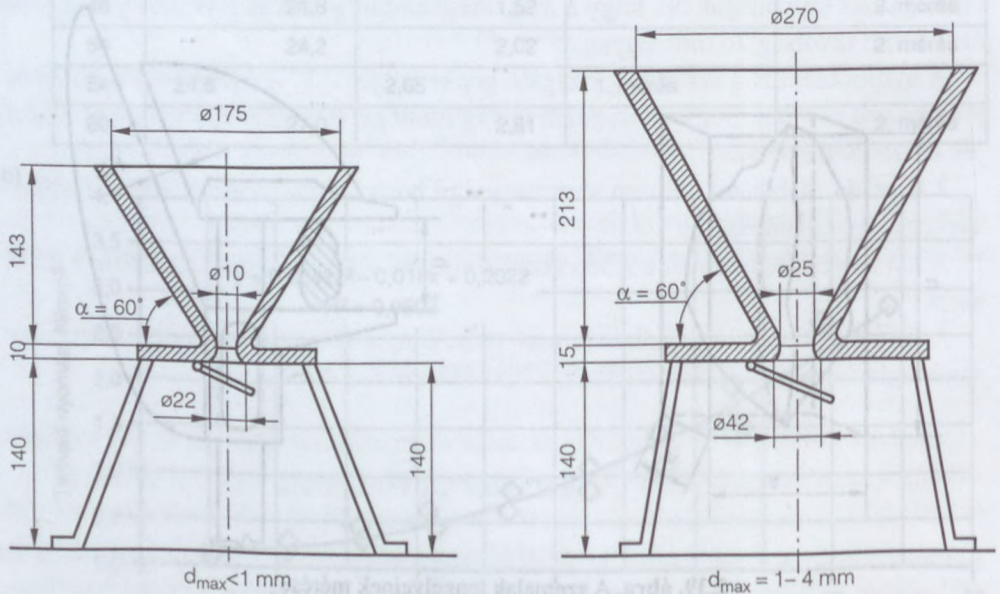
képletből számítják

m a vizsgált anyag tömege, g;

ρ a vizsgált homok testsűrűsége, g/ml;

t az átlagos kifolyási idő, s;

k a kifolyási szám, s/1000 ml



2.40. ábra. A kifolyási érték vizsgálata tölcésrel

A kifolyási szám a homok viszkozitásának a mutatója. A 2.40. ábrán bemutatott készülék hasonlít a sűrű folyadékok viszkozitásának vizsgálatára használt készülékhez. Minél zömökebb a szem, annál kisebb a kifolyási szám, annál mozgékonyabb a homokszem a beton bedolgozása során. A mosás a természetes homok kifolyási számát csökkenti, mivel a lemosott porszemcséknek súrlódásnövelő hatása volt. Zúzott-homok esetén a mosás miatt megnő a kifolyási szám, mivel a lemosott szemcsék a homok érdes felületét töltik ki és súrlódáscsökkentő hatásuk van.

2.3.6. A víztartalom meghatározása és jellemzése

Az adalékanyag víztartalma a tárolás, a szállítás körülményei között változik. A homok több vizet tart magában, mint a kavics. Víztartalma általában nagyobb 5 m%-nál. A beton tulajdonságát viszont a beton víztartalma döntően befolyásolja, ezért gyakran meg kell határozni az adalékanyag víztartalmát. Teljesen automata betongyárakban, keverő telepeken szükség van a nedvességtartalom folyamatos mérésére. Erre a célra a homok-silók kifolyónyílásánál vagy más megfelelő helyen villamos ellenállásváltozás mérésen vagy neutronsugár használatán alapuló (2.41.a ábra) készülékeket építenek be és ezeket a nedvesség meghatározására hitelesítik.

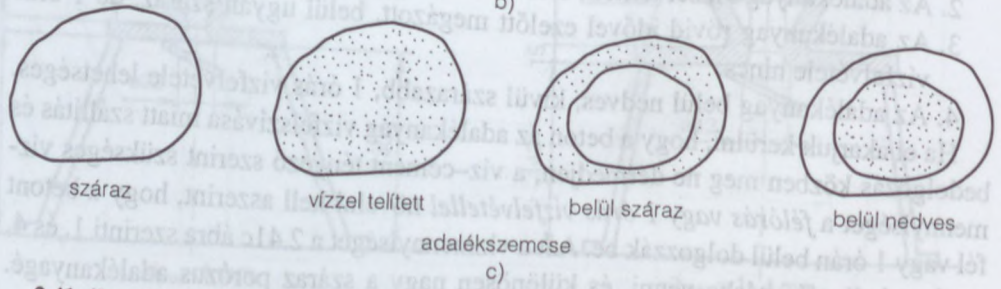
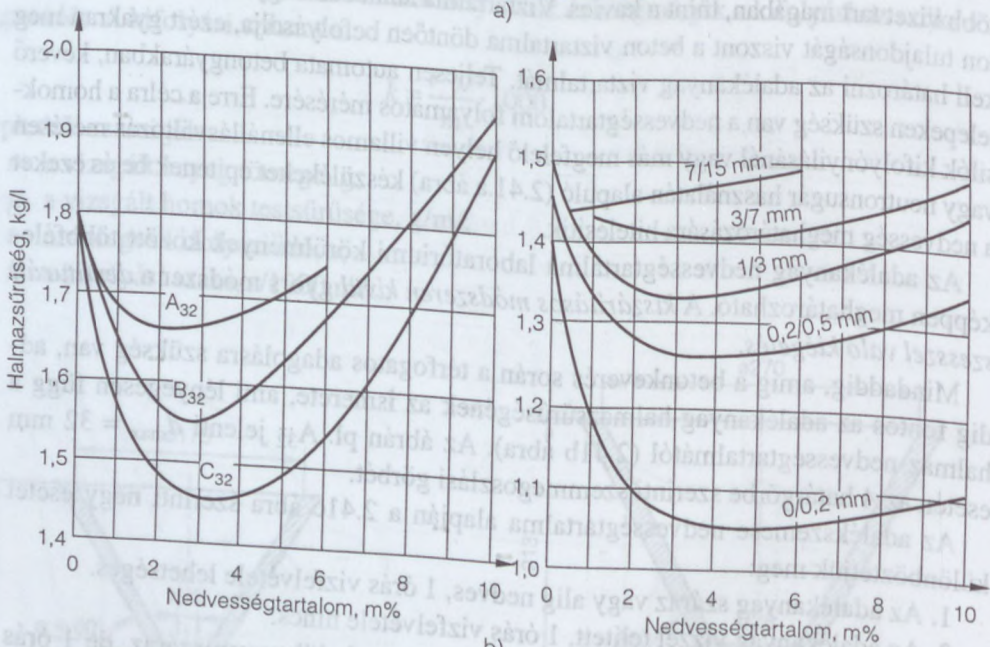
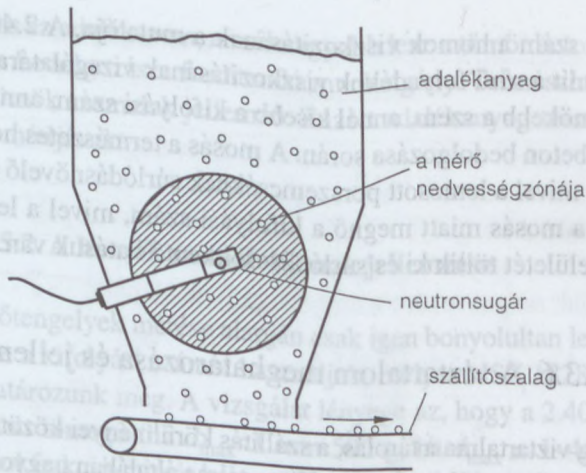
Az adalékanyag nedvességtartalma laboratóriumi körülmények között többféleképpen meghatározható. A *kiszáritásos módszer*en kívül gyors módszer a *denaturált szeszszel való kiégetés*.

Mindaddig, amíg a betonkeverés során a térfogatossá adagolásra szükség van, addig fontos az adalékanyag halmazsűrűségének az ismerete, ami lényegesen függ a halmaz nedvességtartalmától (2.41b ábra). Az ábrán pl. A₃₂ jelenti $d_{\max} = 32$ mm esetén az A határgörbe szerinti szemmegoszlási görbét.

Az adalékszemcse nedvességtartalma alapján a 2.41c ábra szerinti négy esetet különböztetjük meg:

1. Az adalékanyag száraz vagy alig nedves, 1 órás vízfelvétele lehetséges.
2. Az adalékanyag vízzel telített, 1 órás vízfelvétele nincs.
3. Az adalékanyag rövid idővel ezelőtt megázott, belül ugyan száraz, de 1 órás vízfelvétele nincs.
4. Az adalékanyag belül nedves, kívül szárazabb, 1 órás vízfelvétele lehetséges.

Ha el akarjuk kerülni, hogy a beton az adalékanyag vízfelszívása miatt szállítás és bedolgozás közben meg ne dermedjen, a víz-cement tényező szerint szükséges vízmennyiséget a *félórás vagy 1 órás vízfelvétellel* növelni kell aszerint, hogy a betont fél vagy 1 órán belül dolgozzák be. Azt a vízmennyiséget a 2.41c ábra szerinti 1. és 4. esetben kell számításba venni, és különösen nagy a száraz porózus adalékanyagé. A 2. és 3. esetben félórás vízfelvétel nincs.



2.41. ábra. Víz tartalmi jellemzők: a) homok nedvességtartalmának mérése neutronsugárral; b) az adalékanyag halmazsűrűsége a nedvességtartalma függvényében; c) a víz elhelyezkedése az adalékszemcsében

2.3.7. A cementkő és az adalékanyag közötti tapadás

[Balázs (1982), Balázs–Kilián (1975)]

2.3.7.1. A tapadásról általában

Ismert, hogy a beton tulajdonságai (könnyűbetonokat kivéve) rosszabbak mind az adalékanyagközet, mind a cementkő tulajdonságainál. Míg az adalékanyag nyomószilárdsága általában 50-300 MPa, a cementkéé 70–100 MPa, addig a betoné 5–100 MPa. Ez a különbség a két anyag eltérő tulajdonságaira, elsősorban eltérő alakváltozási tulajdonságaira és alakváltozó-képességére, valamint a cementkő és az adalékanyag közötti tapadásra vezethető vissza.

Amidőn a beton szilárdságát (központos nyomásból, ill. húzásból) a törőerőből kiszámítjuk, akkor feltételezzük, hogy a betonban a feszültség állandó. De ez nem így van. A nagy szilárdságú adalékanyagban – azonos összenyomódás esetén – mindig nagyobb a feszültség, mint a cementhabarcsban. A két anyag a tapadás révén dolgozik együtt. A beton tönkremenetele a tapadás megbomlásával kezdődik.

A mikrorepedések, melyek a kötés és a szilárdulás folyamán, valamint kis terhelés esetén keletkeznek, a cementhabarcs és durva adalékanyag határfelületén jelennek meg. Ezeket tapadási repedéseknek nevezzük. A terhelés növelésével ezek megnyílnak. A terheléssel a teherbírás felé haladva megjelennek a pép-, ill. habarcsrepedések, melyeknek mind hossza, mind száma nő a feszültség növekedésével. Végül egyesülnek a tapadási és a habarcsrepedések, a beton tönkremegy.

Az adalékanyag határfelületén tapadási repedéseket okozhatnak a húzó- és nyíróerők egyaránt. Eszerint a tapadás két alapesetét különböztetjük meg:

- a) Húzási típusú tapadási repedés akkor jön létre, ha az adalékanyag felületén a húzófeszültség eléri az adalékanyag húzó-tapadási szilárdságát. Ez az adalékanyag és a habarcs részleges elválását eredményezi.
- b) Nyírási típusú tapadási repedések akkor keletkeznek, ha az adalékanyag felületén a nyírófeszültség eléri a nyíró-tapadási szilárdságot. Ez a jelenség az adalékanyag és a habarcs közötti elcsúszásban jelentkezik.

Utóbbi esetben, ha a húzóerő nagy a nyíróerőhöz képest, a húzási tapadásba való átmenet következhet be. Ily módon a húzási tapadás úgy is felfogható, mint a nyírási igénybevételi mód egyik szélső értéke.

A tapadást a két alapeseten belül természetesen számos tényező befolyásolja. Egyik alapvető tényező a cementkő, annak a hidratáció folyamán a szilárdulási és tárolási feltételektől függő tulajdonságai, az adalékanyag határfelületén kialakuló réteg hidrátszerkezete és összenövése az adalékanyaggal. A másik alapvető tényező az adalékanyag alaptulajdonságai és felületi érdessége.

Éppen ezekből kiindulva szokás **kémiai és mechanikai tapadást** megkülönböztetni. Előbbi elsősorban a cementtől, utóbbi az adalékfelülettől függ.

2.3.7.2. A tapadási szilárdság

Az adalékanyag-cementkő vagy cementhabarcs tapadószilárdságának vizsgálatára sokféle modellt használnak. Az általunk ismerteket a 2.42. ábrán foglaltuk össze.

Eszerint alapvetően kétféle modell ismert, nevezetesen

– húzó-tapadási modell és

– nyíró-tapadási modell.

A húzó-tapadási modellek esetén az adalékközetből és cementhabarcsból (cementpépből) elkészített próbatestet hajlító-húzó, központos húzó vagy hasító-húzó vizsgálatnak vetjük alá, és a törőerőből ennek megfelelően számítjuk a húzószilárdságot.

A nyíró-tapadási szilárdságot *Coulomb–Mohr* képletével szokás kifejezni:

$$f_{\tau, \text{tap}} = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi,$$

ahol $f_{\tau, \text{tap}}$ nyírási-tapadási szilárdság;

σ az egyidejű nyomófeszültség.

c a kohézió.

φ a súrlódási szög.

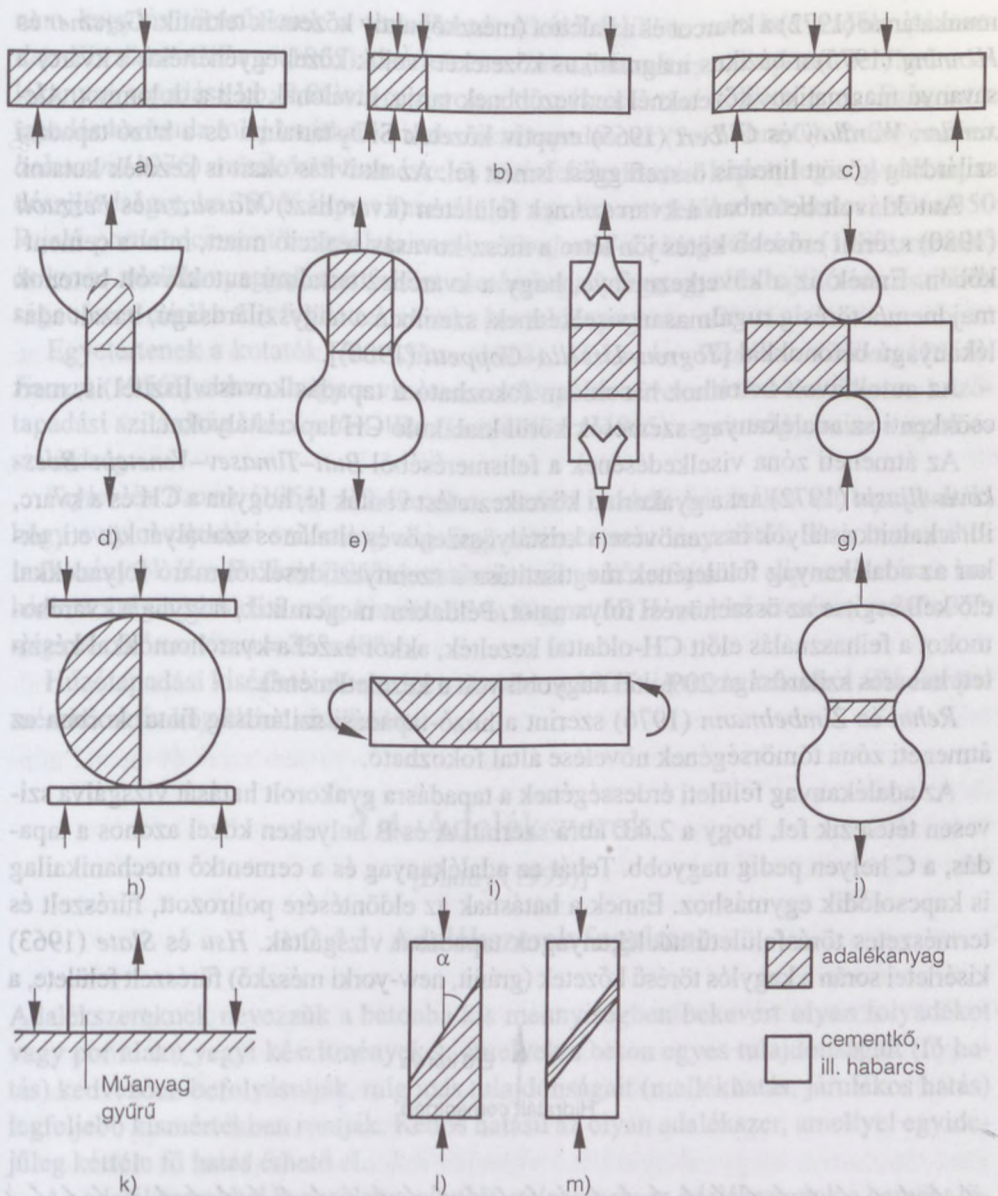
2.3.7.3. Határfelületi reakciók a betonban

Azt már 1895-ben felismerték [*Tomei–Finkenwalde* (1895)], hogy az idősebb habarcsban nem lehet a kvarc szemeket a cementkőtől megkülönböztetni, ami csak úgy lehetséges, hogy a portlandcement és a kvarc szemcsék között kémiai kapcsolat is létrejön. A határfelületi jelenségek módszeres kutatását *Farran* (1956) kezdte el. Abban egyetértenek a kutatók, hogy az adalékanyag és a cementkő között kémiai és fizikai felületi kötés jöhet létre.

A hagyományos beton adalékanyaga körül egy átmeneti zóna alakul ki, amely a cementkőnél porózusabb, kisebb a kohéziója és ez a réteg a beton leggyengébb része. Ebben az is szerepet játszik, hogy az adalékanyag rugalmassági modulusa sokkal nagyobb a cementkőénél. Abban is egyetértenek a kutatók, hogy az átmeneti zóna minősége függ az adalékanyag ásványi felépítésétől.

Eltérően alakul az átmeneti zóna a vízfelszívó, porózus adalékanyagok körül. Egyes kutatók szerint ez esetben nincs átmeneti zóna, ill. az nem különbözik a cementkőtől.

Ebben szerepe van annak is, hogy a könnyű adalékanyagok határfelületének geometriája bonyolultabb, mint a hagyományos adalékanyagoké. Továbbá eltérően alakul az átmeneti zóna aszerint, hogy a felvett vizet az adalékanyag a cementkőnek leadja-e vagy sem. Végül a beton törési mechanizmusa is eltérő a hagyományos betonétól, mivel rendszerint nem az adalékanyag a beton legszilárdabb, legnagyobb rugalmassági modulusú alkotója.



2.42. ábra. Az adalékanyag és a cementkő, cementhabarcs tapadásának vizsgálatára használt modellek *a)–k)* húzó-tapadási modellek; *l), m)* nyíró-tapadási modellek.

Szerzők: *a), b), l): Alexander; m): Taylor és Brooms; j): Henning; k): Rehm és Zimbelmann; c) d) e) f) g) h) i): Mesnager, Farran, Valenta, Hsu és Slate*

Azokat a kőzeteket, amelyeknél a kémiai kötést is feltételezzük, **aktív kőzetek**-nek nevezték el.

Hsu és Slate (1963) az indianai mészkövet, *Farran (1956)* a metamorf mészkövet és a dolomitot (további sorrend: ortoklász, földpát, kvarc, muszkovit, kovakő), *Butt* és

munkatársai (1972) a kvarcot és a kalcitot (mész) aktív kőzetnek tekintik. Gerstner és Henning (1975) a bázikus magmatikus kőzeteket (velük közel egyenértékű a kvarc) a savanyú magmatikus kőzeteknél kedvezőbbnek tartja, kiválónak ítéli a dolomitot. Alexander, Wardlaw és Gilbert (1965) eruptív kőzetek SiO_2 -tartalma és a húzó-tapadási szilárdság között lineáris összefüggést ismert fel. Az aktivitás okait is kezdték kutatni.

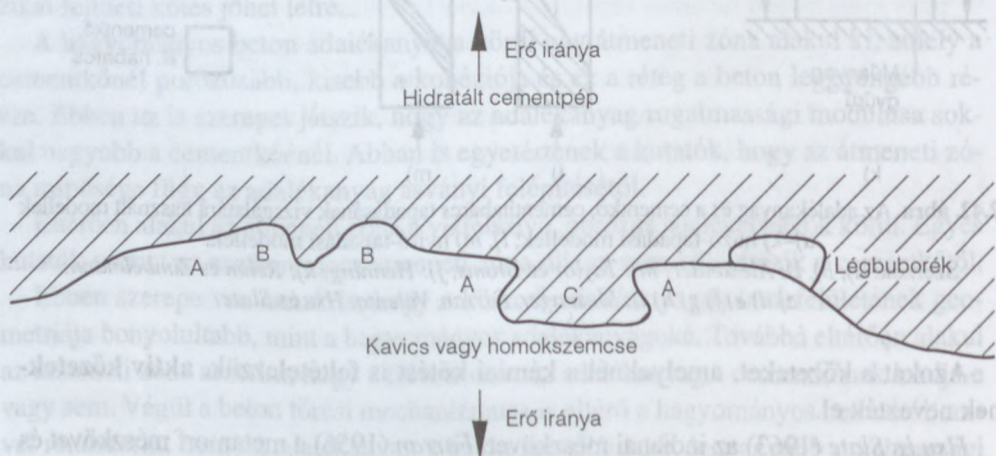
Autoklávolt betonban a kvarc szemek felületén (kvarcliszt) Massazza és Pezzuoli (1980) szerint erősebb kötés jön létre a mész-kovászav reakció miatt, mint a cementkőben. Ennek az a következménye, hogy a kvarcliszt tartalmú autoklávolt betonok majdnem a töréssig rugalmasan viselkednek, szemben a nagyszilárdságú, bazalt adalékanyagú betonokkal [Togron-Ursella-Coppetti (1980)].

Az autoklávolt betonhoz hasonlóan fokozható a tapadás kovasavliszttel is, mert csökkenti az adalékanyag-szemcsék körül kialakuló CH lapkristályokat.

Az átmeneti zóna viselkedésének a felismeréséből Butt-Timasev-Venstein-Bocskova-Iljusin (1972) azt a gyakorlati következtetést vonták le, hogyha a CH és a kvarc, ill. a kalcitkristályok összenövése a kristályösszenövés általános szabályát követi, akkor az adalékanyag felületének megtisztítása a szennyeződésektől maró folyadékkal elő kell segítsen az összenövési folyamatot. Példaként megemlítik, hogyha a kvarchomokot a felhasználás előtt CH-oldattal kezelték, akkor ezzel a kvarchomokkal készített habarcs szilárdsága 20%-kal nagyobb volt a kezeletlenénél.

Rehm és Zimbelmann (1976) szerint a húzó-tapadási szilárdság fiatal korban az átmeneti zóna tömörségének növelése által fokozható.

Az adalékanyag felületi érdességének a tapadásra gyakorolt hatását vizsgálva szívesen tételezik fel, hogy a 2.43. ábra szerinti A és B helyeken közel azonos a tapadás, a C helyen pedig nagyobb. Tehát az adalékanyag és a cementkő mechanikailag is kapcsolódik egymáshoz. Ennek a hatásnak az eldöntésére polírozott, fűrészelt és természetes törésfelületű adalékanyagok tapadását vizsgálták. Hsu és Slate (1963) kísérletei során a kagylós törésű kőzetek (gránit, new-yorki mész) fűrészelt felülete, a



2.43. ábra. A fizikai érdesség szerepe a tapadásban

nem kagylós törésűeknek a természetes törésű felülete volt kedvezőbb. *Alexander–Wardlaw–Gilbert* (1965) kísérletei szerint a csiszolt és a fényezett felületű adalékanyag tapadása kb. 0,66-szorosa volt a természetes törésfelületűének. Eszerint a tapadás harmada tulajdonítható mechanikai tapadásnak (2.43 ábra C). *Rehm és Zimbelmann* (1976) mészkővel természetes törésfelület esetén kapott legnagyobb tapadószilárdságot, ha 350 K kspc-t használt, és a polírozott felület volt kedvezőbb a 350 R jelű portlandcement használata esetén. *Conjeaud–Lelong–Cariou* (1980) mészkő és kvarc adalékanyaggal, tört felület esetén kaptak legnagyobb hajlító-húzószilárdságot és ez mind a tört felülettel, mind a korrall lényegesen nőtt.

Egyetértenek a kutatók [*Hsu–Slate* (1963), *Alexander–Wardlaw–Gilbert* (1965), *Farran* (1956)] abban, hogy a víz–cement tényező növekedésével csökken a húzótapadási szilárdság. *Alexander–Wardlaw–Gilbert* (1965) szerint úgy, mint a nyomószilárdság.

Taylor és Broms (1964) a 2.42e ábra szerinti modellt használva azt tapasztalták, hogy a nyíró-tapadási szilárdság alig függ a víz–cement tényezőtől, ill. a cement-homok aránytól. *Hsu és Slate* (1963) kutatásai szerint a kőzetfajtának alig van hatása a kohézióra, míg a súrlódási szög kismértékben függ attól. Homokkő esetén $\varphi = 30^\circ\text{--}35^\circ$, míg mészkő esetén $\varphi = 35^\circ\text{--}40^\circ$.

Húzótapadási kísérleteink szerint a majdnem 100%-ig tiszta kalcitból álló tinnyei mészkő aktív kőzetként viselkedett.

2.4. Adalékszerek

[*Buday* (1999)]

2.4.1. Adalékszerek fogalma

Adalékszereknek nevezzük a betonba kis mennyiségben bekevert olyan folyadékot vagy por alakú vegyi készítményeket, amelyek a beton egyes tulajdonságait (fő hatás) kedvezően befolyásolják, míg más tulajdonságait (mellékhatás, járulékos hatás) legfeljebb kismértékben rontják. Kettős hatású az olyan adalékszer, amellyel egyidejűleg kétféle fő hatás érhető el.

Az adalékszerekkel kapcsolatos *alapkövetelmények*: az adalékszernek a cement tömegére vonatkoztatott javasolt mennyisége esetén a cement legyen térfogatállandó. A kötési időt csak az adagolás céljának megfelelően befolyásolhatja, károsan nem. Az adalékszer kétszeres adagja sem okozhat elektrokémiai korróziót a bebetonozott acélbetétben. A kloridmentesként forgalomba hozott adalékszer legfeljebb 0,2 m% kloridot tartalmazhat a cementre vonatkoztatva.

Az adalékszereket rendeltetésük szerint a következő csoportokba soroljuk:

- konzisztenciajavítók: képlékenyítők és folyósítók,
- vízzáróságot fokozók (tömítők),

- fagyállóságot fokozók (légpórusképzők),
- kötés- és szilárdulásgyorsítók,
- kötéskeleltetők, ill. kötészátlók,
- fagyászátlók,
- injektálást segítők,
- stabilizálók,
- korrózió ellen védők.

Dr. *Buday Tibor* (1999) kitűnő könyvet írt az adalékszerekről. Ezt a következőkben irányadónak tekintetem. Továbbá a CEMKUT Kft. – rendszeresen felújított – **Betonadalékszer katalógust** ad ki, amely tartalmazza a forgalomba hozott anyagokat. Ezt ajánlom használni. Szerzők: *Gábel Viktória, Valtynyi Dániel és Németh Gáborné*.

2.4.2. Konzisztenciajavító adalékszerek

2.4.2.1. Képlékenyítő adalékszerek

A képlékenyítő adalékszerekkel lehetséges a keverővíz csökkentése, ill. változatlan betonösszetétel esetén a betonkeverék jobb bedolgozhatósága. A képlékenyítő által csökken a betonkeverék kivérzési hajlama, javul összetartó képessége. Azonos betonösszetétel esetén tömörebb lesz a beton, javul pórusrendszere és ezáltal minden tulajdonsága.

Hatóanyaga elsősorban

- a ligninszulfonátok,
- a naftalin-formaldehid szulfonátok,
- a malamin-formaldehid szulfonátok és
- ezek keverékei.

A *hatásmechanizmusukra* egy évtizeddel korábban még az volt a magyarázat, hogy csökkentik a keverővíz felületi feszültségét és (a mosószerekhez hasonlóan) javítják a cement nedvesíthetőségét. Napjainkban a legelterjedtebb magyarázat az [*Buday (1999)*], hogy a képlékenyítő hatás okozója a képlékenyítő vegyi anyagok által létrehozott kiegyensúlyozatlan villamos töltés, amely révén az összetapadt cementszemcsék elválnak egymástól, mozgékonyabbak lesznek, javul a bedolgozhatóság.

A képlékenyítő adalékszerekkel szemben támasztott követelmények a Műszaki Irányelv (MI 4701-2: 1991) Betonadalékszerek. Minőségi követelmények szerint.

A képlékenyítő adalékszerekkel szemben a következő követelményeket támasztjuk: [Műszaki Irányelv, MI 4701-2:1991]:

- Az adalékszer megengedett legnagyobb adagjával készült szabványos folyósságú cementpép kötéskezdeté legfeljebb 20 perccel rövidebb vagy 30 perccel hosszabb, kötésvége pedig legfeljebb 1 órával rövidebb vagy 2 órával hosszabb

lehet, mint az etaloncementpépé. A kötéskezdet nem lehet kevesebb, mint az MSZ EN 196-3:1996 által előírt minimum.

- Az adalékszer javasolt adagjával készült betonkeverék MSZ 4714-3:1986 szerinti területtel meghatározott konzisztenciája legalább 6 cm-rel legyen nagyobb, mint az azonos összetételű 40 ± 2 cm területű etalon-betonkeveréké.
- A konzisztencia területtel mért többletértékét kb. $+20^\circ\text{C}$ -on a betonkeveréknek a keveréstől számított legalább 30 percig meg kell őriznie.
- Az adalékszer javasolt adagjával készült betonkeverék keverővízigénye legalább 10%-kal legyen kisebb, mint az azonos összetételű és konzisztenciájú etalon-betonkeveréké.
- Az adalékszer javasolt adagjával készített friss beton levegőtartalma legfeljebb 1,5 térfogatszázalékkal lehet nagyobb az etalonénál.
- Az adalékszer javasolt adagját tartalmazó betonkeverékből készített, természetes körülmények között szilárduló próbatestek nyomószilárdsága nem lehet kisebb, mint az azonos összetételű (azonos víz–cement tényezőjű), azonos körülmények között szilárdult etalonpróbatesteké.
- Az adalékszer javasolt adagját tartalmazó betonkeverékből készült, természetes körülmények között szilárduló próbatestek nyomószilárdsága legalább 10%-kal legyen nagyobb az azonos konzisztenciájú, azonos körülmények között szilárduló etalonpróbatestekénél. A szilárdságtöbblet 90 napos korban 5%-ra csökkenhet.
- Az adalékszer javasolt adagját tartalmazó betonkeverékből készülő gőzérlelt próbatestek viszonylagos nyomószilárdsága, az azonos konzisztenciájú etalon-próbatestek nyomószilárdságához viszonyítva 1, 7, 28 és 90 napos korban rendre legalább 100, 115, 110 és 105% legyen.
- Légpórusképző mellékhatásúnak tanúsított képlékenyítő adalékszer javasolt adagjával készülő, az etalonnal azonos összetételű friss beton összes levegőtartalma legalább 3 térfogatszázalék, az adalékszerrel keltett többlet-levegőtartalom pedig legalább 1,5 térfogatszázalék legyen.

2.4.2.2. Folyósító adalékszerek

A folyósító adalékszerek konzisztenciajavító hatása nagyobb a képlékenyítő adalékszerekénél. Három célból adagoljuk a betonba:

- A betonkeverék mozgékonyságának (konzisztenciájának) jelentős növelése azonos víz–cement tényezővel.
- A konzisztencia mérőszám változatlanul hagyásával a víz–cement tényező 10–30%-os csökkentése, és ezáltal a szilárdság növelése.
- A két hatás mérsékeltebb, de együttes elérése.

A folyósító adalékszerek négy fő csoportja:

- tisztított, módosított ligninszulfonát,
- szulfonált melamin-formaldehid kondenzátum,
- szulfonált naftalin-formaldehid kondenzátum,
- szulfonált vinilpolimerek.

Folyósító adalékszerek *hatásmechanizmusa*:

A **folyósítók** általában műgyanta-diszperziók, pl. melamingyanta-alapúak. Hatásuk nem a felületi feszültség csökkentésében nyilvánul meg, hanem azzal magyarázható, hogy a pórusrendszert *hidrofóbbá* (víztaszítóbbá) *teszik*. A folyósítókkal önterülő, folyós betont lehet előállítani anélkül, hogy a beton szétosztályozódna, felületére a keverővíz egy részét feladná (vérzésnek nevezzük) és csökkenne a szilárdulás sebessége.

A keverővízzel adagolt folyósító a pórusokban egyenletesen oszlik el. Ezekbe a pórusokba a cement hidrátjai belenőnek. A legújabb folyósítóknak kémiai hatása is van, ezért kiemelkedő a cementdiszpergáló és viszkozitáscsökkentő hatásuk.

A folyósító adalékszerekkel szemben a következő követelményeket támasztjuk:

- Kötési folyamattal kapcsolatos követelmények azonosak a 2.4.2.1. fejezetben leírtakkal.
- Az adalékszer javasolt adagját tartalmazó betonkeverék MSZ 4714-3:1986 szerinti területtel meghatározott konzisztenciája legalább 12 cm-rel legyen nagyobb, mint az azonos összetételű, 40 ± 2 cm területű etalon-betonkeveréké.
- A konzisztencia területtel mért többletértékét az adalékszer javasolt adagjával készült betonkeveréknek kb. $+20$ °C-on a keveréstől számított legalább 30 percig meg kell őriznie.
- Az adalékszer javasolt adagjával készült betonkeverék keverővíz-igénye legalább 15%-kal legyen kisebb, mint az azonos összetételű és konzisztenciájú etalon-betonkeveréké.
- Az adalékszer javasolt adagját tartalmazó friss beton levegőtartalma legfeljebb 1,5 térfogatszázalékkal lehet nagyobb az etalon friss betonénál.
- Az adalékszer javasolt adagját tartalmazó betonkeverékből készült, természetes körülmények között szilárduló próbatetek nyomószilárdsága 7, 28 és 90 napos korban legfeljebb 5%-kal lehet kisebb, mint az azonos összetételű (azonos víz–cement tényezőjű), azonos körülmények között szilárdult etalonpróbateteké.
- Az adalékszer javasolt adagját tartalmazó betonkeverékből készült, természetes körülmények között szilárduló próbatetek nyomószilárdsága 7, 28 és 90 napos korban rendre legalább 15, 10 és 5%-kal legyen nagyobb az azonos konzisztenciájú, azonos körülmények között szilárduló etalonpróbatetekénél.
- Az adalékszer javasolt adagját tartalmazó betonkeverékből készült gőzérlelt próbatetek viszonylagos nyomószilárdsága az azonos konzisztenciájú etalonpróbatetek nyomószilárdságához viszonyítva 1, 7, 28 és 90 napos korban rendre legalább 100, 115, 110 és 105% legyen.

– Légpórusképző mellékhatásának tanúsított folyósító adalékszer javasolt adagjával készített, az etalonnal azonos összetételű friss beton összes levegőtartalma legalább 3 térfogatszázalék, az adalékszerrel keltett többlet-levegőtartalom pedig legalább 1,5 térfogatszázalék legyen.

A folyósító adalékszerekkel – az 1970-es évektől – a sűrű vasalás között könnyen elhelyezhető öntöttbetont állították elő szívesen, napjainkban az öntömörödő beton nélkülözhetetlen alkotója.

2.4.3. Vízáróságot fokozó adalékszerek

A vízáróságot fokozó adalékszerek feladata a betonban levő kapilláris pórusok szűkítése, ill. elzárása vagy a pórusfalak hidrofóbbá tétele által a vízfelvétel, ill. a víztárolás csökkentése. Utóbbiak a felületi bevonó anyagok csoportjába tartoznak.

Tömítőhatás olyan finomeloszlású anyagokkal érhető el, amelyek vízzel érintkezve megduzzadnak. Erre a célra duzzadó szilikátokat (pl. trasz) és egyéb anyagokat (pl. bentonit) használnak. Hidrofobizáló anyagoknak rendszerint fémszappanokat használnak.

2.4.4. Fagyállóságot fokozó adalékszerek

A fagy roncsoló hatása annak a következménye, hogy a víz megfagyásakor kb. 1,1-szeresére kiterjed. Ha ezt a kitágulást megakadályozzuk, akkor a fellépő hidrosztatikai nyomás elérheti a 250 MPa-t. Ennek a nyomásnak semmilyen beton nem tudna ellenállni.

Légbuborékképző adalékszerek adagolásának az a célja, hogy a betonba keverés során kellő mennyiségű, finoman elosztott gömb alakú légbuborékot juttassunk. Az ilyen mikrolégbuborékok alkalmasak arra, hogy a beton megfeleljen a különleges fagyállósági követelményeknek, valamint ellenálljanak a jégolvasztó sók káros hatásának.

A légbuborékok azáltal, hogy megszakítják a kapillárispórusokat, megakadályozzák a beton vízzel telítődését. Megfagyáskor pedig lehetővé teszik, hogy a táguló jég vagy a nyomás alatt túlhűtött víz a kapillárispórusokból az üres légbuborékba hatolva lényegesen csökkentse a fagy okozta kárt (Powers-elv). A betonban a gömb alakú légpórusok keletkezését olyan szerves anyagok (szulfonátok: alkil-szulfonátok, szulfonsavak sói és észterei, szappanok: magasabb zsírsavak fémsói) adagolásával érjük el, amelyek molekulái hidrofób (vizet taszító) és hidrofil (vizet vonzó) láncokból vannak felépítve. A szerves anyagok molekulái hidrofób láncukkal a cementszemcse felé, hidrofil láncukkal pedig a víz felé fordulnak, s így elősegítik a cementszemcse vízfelvételét. Nagyobb adagolás esetén olyan mennyiségű hidrofób gyök jut a vízbe, hogy már nem képesek elég vízfelületet találni a levegő vagy a szilárd anyag hatására, ezért hidrofób gyökükkel légpórusokat kötnek meg és tartanak meg a megszilár-

dulásig. Az adalékszer mennyiségének további növelése már annyira megnöveli a pórustartalmat, hogy lényegesen csökken a szilárdság.

Nem elég azonban csak a légtartalmat betartani, hanem ennek hatékony, 20–300 μm átmérőjű légbuborékokból kell lennie.

A légpórusképző adalékszer hatására valamelyest csökkenthető a víz–cement tényező: ennek oka, hogy a légpórusok finom szemcsékként – golyóscsapágyként – viselkedve a mozgásban lévő betonkeverék belső súrlódását csökkentik. Jobb a légpórusos beton állékonyága, kisebb a vízleadása, mint a légpórus nélkülié. A beton szilárdsága a légpórustartalom miatt csökken, és jó közelítéssel azt mondhatjuk, hogy 1 V% légpórustartalom növekedésének 5% nyomószilárdság-csökkenés felel meg. A húzószilárdság csökkenése valamivel kisebb.

A fagyállóságot fokozó adalékszer hatóanyaguk alapján lehetnek természetes és mesterséges eredetűek [Erdélyi–Valtynyi (1976), Buday (1999)].

Természetes alapú adalékszer:

– cellulózszármazékok (ligninszulfonát),

– természetes kolofóniumgyanta feldolgozásából nyert abietinsav alkáli- vagy alkáli-földfém-sói,

– cisztein-aminosav-tartalmú állati fehérjéből lúgos hidrolízissel lebontott termékek,

– fakátrányból vagy aszfaltból nyert mono- vagy polisavak alkálifém-szappanai,

– tengeri moszatokból izolált alginsav alkáliföldfém-sói (Ca- és Mg-alginátok).

Szintetikus eredetű adalékszer:

– vinsolgyanták – hőre lágyuló savas polimerek alkálifém-sói,

– melamingyanta szulfonsavas sók,

– alkil- és aralkil-fenol-poliglikol éterek,

– polihidroxil-karbon savak sói (acidolok),

– nafténsavak K- és Na-szappanai,

– akril és aralkilkarbonsavak, valamint szulfonsavak alkálifém-sói,

– szerves szilíciumvegyületek: polietil- vagy polimetil-fenilhidrosziloxán, Na-metil (etil) szilikonátok.

A mesterséges eredetű légpórusok nagysága és mennyisége az adagolt szer mennyiségétől függ. Ezenkívül befolyásolja

– a cement fajtája, őrlési finomsága és mennyisége,

– az adalékanyag szemszerkezete,

– a betonkeverék konzisztenciája,

– a keverőgép típusa és töltési mértéke,

– a keverés időtartama és intenzitása,

– a szállítás módja és tartama,

– a tömörítés módja és tartama és

– a beton hőmérséklete.

A betont a betonelőállítás tényleges körülményei szerint kell megtervezni, és nélkülözhetetlen a próbakeverés.

A betont csak akkor szabad átvenni, ha a beton előírt légtartalma – a 3.3.2.6. fejezet szerint vizsgálva – megvan. Ezen túl vizsgálni kell a szilárd beton *távolsági tényezőjét* is. Az ASTM (1990) szabvány szerint a távolsági tényező a cementpépben lévő, ún. hatásos (20–300 µm átmérőjű) légpórusok egymástól távolságára jellemző érték. A javasolt érték: szigorú időjárési viszonyok között legfeljebb 0,1–0,15 mm, enyhe időjárás esetén legfeljebb 0,25–0,30 mm.

2.4.5. Kötés- és szilárdulásgyorsító adalékszerek

Használatuk célja a cement kötéseinek és (vagy) szilárdulásának a gyorsítása. Az építési feladatok, amelyekhez e szerekre szükség van:

- a) vízbetörések tömitése, viszonylag vastag réteg felvitele rövid idő alatt (torkrét-beton), kőcsavarok rögzítése;
- b) a beton kezdeti szilárdulásának gyorsítása, kiszaluzhatóság, terhelhetőség idejének csökkentése;
- c) téli építési munkák esetén a kezdeti szilárdulás gyorsítása és ezáltal a fagyvesztés csökkentése (pl. használták panelos épületek hézaghabarcsainak a készítéséhez).

Ezeknek az anyagoknak két fő típusát különböztetjük meg: a sókat és a lúgos anyagok csoportját. Az összes anyagtípus megtalálható *Erdélyi – Valtinyi* (1978)-ban.

A sók közé tartozik a kalcium-klorid, a nátrium-klorid, a nátrium-szulfát, az alumínium-klorid stb. Hatásukat azáltal fejtik ki, hogy katalizátorként meggyorsítják a C_3S és βC_2S szilárdulását, növelve azok oldhatóságát. Ebbe a csoportba tartozó hazai szer a Tricosal S III. A sók a bebetonozott acél korrózióját okozhatják. A kalcium-klorid okozta hatás mérsékelhető $NaNO_2$ (nátrium-nitrit) inhibitor adagolásával. Ilyen a Kalcidur NV jelű adalékszer.

Lúgos kötés gyorsítók a nátrium és kálium hidroxidjai, karbonátjai (pl. szóda) és szilikátjai (pl. vízüveg). Ezek azonban csökkentik a cementhabarcs szilárdságát.

A leghatásosabb kötés gyorsító adalékszer, a kalcium-klorid betonban kifejtett hatását (kötés, szilárdság, gőzölés, zsugorodás, hidratációhő, acélkorrózió) az Építőanyagok Tanszéken igen sokoldalúan vizsgálták [*Balázs* (1963), *Balázs–Tamás* (1964)], *Zimonyi–Balázs*, *Palotás–Kilián–Balázs* (1962), *Balázs–Tamás–Zimonyi* (1965), *Balázs* (1987), *Balázs* (2001). A korróziós károsodások miatt, beleértve a pécsi magasházat is, külföldön megtiltották a kalcium-klorid tartalmú adalékszerek használatát. Az MSZ 4798-1:2004 a 2.17. táblázat szerinti mennyiséget engedi meg. Ebben benne van a cementben, az adalékanyagban, a keverékekben lévő összes kloridion. Pl. a vasbeton szerkezetek gyártásához használt alkotó anyagok megengedett vízdoldható kloridion-tartalma a következő:

– Cement (MSZ EN 197-1:2000)

az MSZ EN 196-21:1992 szerint vizsgálva: $\leq 0,1$ tömegszázalék

– Víz (MSZ EN 1008:2003)

az MSZ EN 196-21:1992 szerint vizsgálva: $\leq 0,1$ tömegszázalék

– Adalékanyag – beleértve a kiegészítő anyagként

alkalmazott kölisztet is – (MSZ EN 12620:2002),

felületéről leoldható kloridtartalom,

az MSZ EN 1744-1:2001 szerint vizsgálva: $\leq 0,1$ tömegszázalék

– Adalékszer (MSZ EN 934-2:2004)

az MSZ EN 480-10:1998 szerint vizsgálva: $\leq 0,1$ tömegszázalék

2.17. táblázat. A beton legnagyobb kloridtartalma a cementtartalom tömegszázalékában kifejezve (az MSZ EN 4798-1:2004 szerint)

A beton alkalmazása	Kloridtartalom-osztály ^{a)}	A legnagyobb Cl-tartalom a cementtartalom tömegszázalékában ^{b)}
Nem tartalmaz acélbetétet vagy más beágyazott fémeket, kivéve a korrózióálló emelőfüleket	Cl 1,0	1%
Acélbetétet vagy más beágyazott fémeket tartalmaz	Cl 0,20 Cl 0,40 ^{c)}	Cl 0,20% Cl 0,40% ^{c)}
Feszített acélbetétet tartalmaz	Cl 0,10 Cl 0,40 ^{c)}	Cl 0,10% Cl 0,20% ^{c)}

^{a)} Különleges betonfelhasználás esetén az alkalmazott osztály függ a beton felhasználási helyén érvényes utasításoktól.

^{b)} Ha II típusú kiegészítőanyagot alkalmazunk, és ezt beszámítjuk a cementtartalomba, akkor a cement + teljes mennyiségű kiegészítőanyag tömegszázalékában kifejezett kloridion az a kloridtartalom, amelyet számításba kell venni.

^{c)} Kizárólag nedvességtől elzárt térben lévő szerkezetek esetén szabad megengedni.

2.4.6. Kötéskésleltetők és kötésátlók

A frissbeton eltarthatóságán, tárolhatóságán azt – a keveréstől számított, órákban kifejezett – időtartamot értjük, amelynek elteltével a frissbetonból vett minta testsűrűsége, konzisztenciája és a belőle készített próbatestek szilárdsága legfeljebb a megengedett tőrésel különbözik a frissbetonból közvetlenül a keverés után vett próbán mért értékétől. A frissbeton tárolhatóságát segítik elő a *kötéskésleltető adalékszerek*. Ezek használatát a következő építési feladatok indokolják:

a) beton szállítása nagy távolságra (pl. transzportbeton);

b) a betonozást néhány órára meg kell szakítani, de a szerkezetet munkahézag nélkül szeretnék megépíteni;

c) a hőfejlődés késleltetése nyári melegben, vastag betontömbökben (tömegbeton).

Hatásmechanizmusuk a gyorsítókéhoz hasonló, de ellentétes értelmű.

Kötéskésleltetők: keményítők (pl. dextrin), cukrok, bórax, kalcium-nitrát, szerves oxisavak stb. Hazai kötéskésleltető a citromsav hatóanyagú Retardol.

A *kötésátlók* rendeltetése, hogy a beton felületi kérgén a cement kötését teljesen meggátolják. Ez a réteg a beton többi részének megszilárdulása után kimosható,

kikefélhető és ezáltal esztétikus, pl. adalékmintas betonfelület állítható elő. A kötési-
késleltetők nagyobb mennyiségben kötésgátlók.

2.4.7. Fagyásgátló adalékszerek

Alkalmazásuk célja a betonozási időszak meghosszabbítása fagyponthoz közeli hő-
mérsékleten.

Alapvető követelmény, hogy a beton kockaszilárdsága érje el az 5 MPa-t, mielőtt
a beton megfagyna. Ez kétféleképpen érhető el: vagy meggátoljuk, hogy a betonban
lévő víz megfagyjon vagy megnöveljük a hidratációhőt, úgyhogy a beton minél
később hűljön le. Ilyen adalékszerekkel $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ léghőmérsékletig lehet betonozni, ha
alábbi intézkedéseket is megtesszük:

- Nagy kezdő, ill. végszilárdságú cement használata. A heterogén cementeket mel-
lőzni kell.
- A cementtartalom növelése, ha arra a szilárdság miatt nincs is szükség.
- Kis vízfelszívású adalékanyag használata.
- A víz–cement tényező legyen 0,6-nál kisebb.
- Képlékenyítő, folyósító adalékszerek használata, a könnyű bedolgozhatóság és
a kis víztartalom miatt.
- A keverővíz és az adalékanyag melegítése. Egyébként védelme a megfagyástól.
- A megkevert beton minél gyorsabb szállítása és bedolgozása.
- A zsaluzat és a szabad betonfelület hőmentesítése. A zsaluzat védelme hőszige-
telőréteggel.
- A megépített beton szükség szerinti melegítése, ill. pl. sátorban a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli
léghőmérséklet biztosítása.

A fagyásgátló adalékszereknek két fő csoportja van: a kloridmentes adalékszerek
a keverővíz megfagyását gátolják meg, a kloridtartalmúak gyorsítják a szilárdulást.

2.4.8. Injektálást segítő adalékszerek

Ezeket az adalékszereket utófesztített betonszerkezetek kábelcsatornái injektálására,
valamint szerkezeteinek valamennyi területén a repedések, hézagok, üregek, póru-
sos részek injektálására használt cementhabarcs-hoz, cementpéphez adagoljuk.

2.4.9. Stabilizáló adalékszerek

A stabilizáló adalékszereket alábbi területeken használják:

- Megakadályozzák a könnyű adalékanyag-szemcsék felúszását.

- Elősegítik a látszóbeton esztétikus megjelenésének kialakítását.
 - Megakadályozzák, hogy a víz alatti betonozás során, a vizen keresztül lebecsátott betonból a cement lényegesen kimosódjék.
 - Lövellt betonozás esetén csökkenjen a visszahullás.
 - Szivattyúzott beton esetében csökkenjen a sűrűlódás a beton és a csőfal között.
- A stabilizáló adalékszerek lehetnek
- + cellulózszármazékok,
 - polimerek,
 - + nagy finomságú szervesetlen porok,
 - finom szálvagdalékok,
 - duzzadó ásványi anyagok.

2.4.10. Korrózió ellen védő adalékszerek

2.4.10.1. A beton korrózióját gátló adalékszerek

A vasbeton szerkezetnek mind a betonját, mind az acélbetétét érheti korrózió. A korrózió típusa szerint használunk eltérő adalékszereket [Valtyni (1995)].

A betonkorrózió típusait az MI 17215-2:1986 négy csoportba sorolta. Ebből háromban a korróziót az okozza, hogy a cement szilárdulása során felszabaduló mészkimosódik vagy savas közeg, ill. olaj, zsír hatására megkötődik, közben a beton ronc-szolódik. Kétféle hatóanyagú adalékszerrel lehet védekezni.

1. *Lúgálló és saválló polimerekkel*, amelyek por vagy vizes diszperziós formájában keverünk a betonba, a cement tömegére vonatkoztatott 3–5%-ban. Ezek a finoman eloszlott polimerekből – a cementkötés kezdetén – vékony film képződik a cementszemcsék felületén, amely végig csökkenti a vízfelvételt és meggátolja az agresszív vegyi anyagok cementhez jutását.
2. *Fluát jellegű szervesetlen sókkal*, amelyek a cementből felszabaduló mésszel reakcióba lépnek, saválló, vízben oldhatatlan sókat hoznak létre, amelyek a keletkezett kapilláris pórusokat szűkítik, és ezáltal gátolják az agresszív anyagok betonba hatolását. Ez a módszer felületi kezelést jelent.

2.4.10.2. Az acélbetét korrózióját gátló adalékszerek

Az acélbetét elektrokémiai korróziója végbemehet

- a betonba bekevert kloridok hatására,
- a betonba jutó légszennyező anyagok által és végül
- a téli jégtelenítő sózás által a kapillárisokon át bejutó kloridionok által.

Az acélbetét korróziója ellen védő adalékszerek vízben oldott hatóanyagai lehetnek redukáló hatású nitritsók (pl. NaNO_2 = nátrium-nitrit), amelyek úgy védik a betonacélt, hogy a levegő pórusokba hatolásakor előbb oxidálódnak nitrátokká, mielőtt az acél anódos oxidációja bekövetkezne. Lehetnek szerves nitrogénvegyületek, amelyek a betonba keverve passzív réteget alkotnak az acélbetét felületén, és ez lesz a korrózió ellen védő közeg.

2.4.10.3. Biológiai korrózió ellen védő szerek

Biológiai korrózió bekövetkezhet szennyvízcsatornáknban, szennyvíztisztító medencékben, kórházakban, a talajban lévő mikroorganizmusok által, különféle növények (pl. algák, mohák) savtermelése, madarak által. A védekezés lényege a beton lúgossága csökkenésének a megakadályozása. Célszerű biocid (baktericid, fungicid) adalékszereket (pl. alkálifém- fluoridok, -borátok, szerves klór-, ill. krezol), vegyületeket használni.

2.4.11. Az adalékszerek összeférhetősége

Az adalékszerek csak akkor fejtik ki főhatásukat, ha a cementtel és a többi, egyidejűen adagolt adalékszerrel összeférhetőek. Az adalékszereket akkor tekintjük összeférhetőnek, ha a gyártó által javasolt sorrendben és mennyiségben adagolva mind a friss, mind a megszilárdult beton jellemzői teljesítik az előírt követelményeket.

A gyártó által előírt mennyiséget és sorrendet szigorúan be kell tartani. Egy építmény betonozásához egy gyártótól vásároljuk valamennyi adalékszert. Fontos, hogy több adalékszer együttes adagolásakor végezzünk előzetes ellenőrző vizsgálatot még akkor is, ha adalékszerenként külön-külön már elvégeztük azt.

2.4.12. Az adalékszerekkel szemben támasztott követelmények

Az MSZ EN 934-2:2002 szabvány szerinti általános követelményeket a 2.18. táblázat, kiegészítő követelményeket a 2.19.–2.32. táblázat tartalmazza.

8.	Összes korróziómentesség	ISO 11380	Lehetőleg a gyártó által megadott érték.
9.	Vízoldható korróziómentesség (C ₁ -P)	EN 480-10	Vagy $\leq 0,10$ tömegszázalék vagy lehetőleg a gyártó által megadott érték.
10.	Alkális korróziómentesség (V ₁ -O-C ₁ -P)	EN 480-12	Lehetőleg a gyártó által megadott érték.

2.18. táblázat. Általános követelmények

Sorszám	Tulajdonság	Vizsgáló eljárás	Követelmények
1.	Egyenletesség ^{a)}	Szemrevételezés	Alkalmazáskor egyenletes legyen. A szétosztályozásnak nem szabad túllépnie a gyártó által megadott határokat.
2.	Szín ^{a)}	Szemrevételezés	Egyöntetű és a gyártó által adott leírásnak megfelelő legyen.
3.	Hatékony alkotórészek ^{a)}	EN 480-6 ^{b)}	Annak kimutatására, hogy nincs lényeges változás a hatékony alkotórészekben, az infravörös szinkép (IR) – összehasonlítva a gyártó által megadott szinképpel – nem mutathat lényeges eltérést.
4.	Relatív sűrűség ^{a)} (csak folyékony adalékszerekre)	ISO 758	$D \pm 0,03$, ha $D > 1,10$ $D \pm 0,02$, ha $D \leq 1,10$ ahol D a gyártó által megadott érték.
5.	Szokásos szárazanyag-tartalom ^{a)}	EN 480-8 ^{c)}	$0,95 T \leq X < 1,05 T$ $T \leq 20\%$ esetén; $0,90 T \leq X < 1,10 T$ $T < 20\%$ esetén; T a gyártó által megadott tömegszázalékos érték; X a vizsgált érték tömegszázalékban.
6.	PH-érték ^{a)}	ISO 4316	A gyártó által megadott érték ± 1 vagy a gyártó által megadott tartományon belül maradjon.
7.	Kötésre gyakorolt hatás az ajánlott adagolás legnagyobb értéke esetén	Az EN 480-2 szerinti vizsgálat az ajánlott adagolás legnagyobb értékével, az EN 480-1 szerinti referenciahabarcsban 4 különböző cementtel.	Az eredmények megadása.
8.	Összes klórtartalom ^{a, d)}	ISO 1158 ^{e)}	Vagy $\leq 0,10$ tömegszázalék ^{h)} vagy legfeljebb a gyártó által megadott érték.
9.	Vizoldható kloridtartalom (Cl ⁻) ^{a)}	EN 480-10	Vagy $\leq 0,10$ tömegszázalék vagy legfeljebb a gyártó által megadott érték.
10.	Alkálitartalom (Na ₂ O-egyenérték)	EN 480-12	Legfeljebb a gyártó által megadott érték.

2.18. táblázat (folyt.) Általános követelmények

Sorszám	Tulajdonság	Vizsgálati eljárás	Követelmények
11.	Korróziós viselkedés	f, g)	Nem lehet korróziót elősegítő hatása a betonba ágyazott acélra.

- a) A gyártó által meghatározott értéket a felhasználó részére írásban kell megadni.
- b) Ha az EN 480-6 módszere nem alkalmas, akkor a gyártónak kell ajánlania alternatív vizsgálati módszert.
- c) Ha az EN 480-8 módszere nem alkalmas, akkor a gyártónak kell ajánlania alternatív vizsgálati módszert.
- d) Ha az összes klórtartalom és a vízoldható klóridtartalom között nincs lényeges eltérés, akkor az adalékszerre vonatkozó következő vizsgálat alkalmával csak a vízoldható klóridtartalmat kell meghatározni.
- e) Az ISO 1158 szerinti eljárást a következőképpen kell módosítani:
 – a száraz adalékszer mintáját 0,1 g-ra kell növelni,
 – 0,01 N ezüst-nitrát- és ammónium-tiocianát-oldatokat kell használni.
- f) A vizsgálathoz 5 tömegszázaléknál kisebb C_3A -tartalmú CEM I cementet kell használni.
- g) Amíg nincs elfogadott európai szabvány, a felhasználás helyén érvényes nemzeti előírásokat kell alkalmazni, ha ez kívánatos.
- h) Ha a klóridtartalom $\leq 0,10$ tömegszázalék, az adalékszert „klóridmentesnek” szabad megjelölni.

2.19. táblázat. Képlékenyítő adalékszerek kiegészítő követelményei (azonos konzisztencia mellett)

Sorszám	Tulajdonság	Referenciabeton	Vizsgálati eljárás	Követelmények
1.	Vizigény csökkentés	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	Roskadási mérték EN 12350-2 vagy területi mérték EN 12350-5	A vizsgálati keverékben $\geq 5\%$ az ellenőrző keverékkel összehasonlítva.
2.	Nyomószilárdság	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	prEN 12390-3:1999	7 és 28 napos korra: a vizsgálati keverékben legalább az ellenőrző keverék értékének 110%-a.
3.	A frissbeton levegőtartalma	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	EN 12350-7	A vizsgálati keverék értéke ≤ 2 térfogatszázalékkal nagyobb, mint az ellenőrző keveréké, ha a gyártó mást nem ad meg.

2.20. táblázat. Folyósító adalékszerek kiegészítő követelményei
(azonos konzisztencia mellett)

Sorszám	Tulajdonság	Referenciabeton	Vizsgálati eljárás	Követelmények
1.	Vizigény csökkenetés	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	Roskadási mérték EN 12350-2 vagy területi mérték EN 12350-5	A vizsgálati keverékben $\geq 12\%$ az ellenőrző keverékkel összehasonlítva.
2.	Nyomószilárdság	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	prEN 12390-3:1999	1 napos korra: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 140%-a. 28 napos korra: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 115%-a.
3.	A frissbeton levegőtartalma	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	EN 12350-7	A vizsgálati keverék értéke ≤ 2 térfogatszázalékkal nagyobb, mint az ellenőrző keveréké, ha a gyártó mást nem ad meg.

2.21. táblázat. Folyósító adalékszerek kiegészítő követelményei
(azonos víz/cement tényező mellett)

Sorszám	Tulajdonság	Referenciabeton	Vizsgálati eljárás	Követelmények
1.	A konzisztencia növelése	EN-480-1 szerinti IV. referenciabeton	Roskadási mérték EN 12350-2 vagy területi mérték EN 12350-5	Roskadási mérték növekedése ≥ 120 mm a kiindulási (30 ± 10) mm értékhez képest. Területi mérték növekedése ≥ 160 mm a kiindulási (350 ± 20) mm értékhez képest.
2.	A konzisztencia megtartása	EN-480-1 szerinti IV. referenciabeton	Roskadási mérték EN 12350-2 vagy területi mérték EN 12350-5	A vizsgálati keverékben mérve 30 perccel az adagolás után legalább az ellenőrző keverék kezdeti értéke.
3.	Nyomószilárdság	EN-480-1 szerinti IV. referenciabeton	prEN 12390-3:1999	28 napos korra: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 90%-a.
4.	A frissbeton levegőtartalma	EN-480-1 szerinti IV. referenciabeton	EN 12350-7	A vizsgálati keverék értéke ≤ 2 térfogatszázalékkal nagyobb, mint az ellenőrző keveréké, ha a gyártó mást nem ad meg.

2.22. táblázat. Stabilizáló adalékszerek kiegészítő követelményei
(azonos konzisztencia mellett)

Sorszám	Tulajdonság	Referenciabeton	Vizsgálati eljárás	Követelmények
1.	Víz kiválás (vérzés)	EN-480-1 szerinti II. referenciabeton	EN 480-4	A vizsgálati keverék értéke $\leq 50\%$ -a az ellenőrző keverék értékének.
2.	Nyomószilárdság	EN-480-1 szerinti II. referenciabeton	prEN 12390-3:1999	28 napos korra: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 80%-a.
3.	A frissbeton levegőtartalma	EN-480-1 szerinti II. referenciabeton	EN 12350-7	A vizsgálati keverék értéke ≤ 2 térfogatszázalékkal nagyobb, mint az ellenőrző keveréké, ha a gyártó mást nem ad meg.

2.23. táblázat. Légbuborékképző adalékszerek kiegészítő követelményei
(azonos konzisztencia mellett)

Sorszám	Tulajdonság	Referenciabeton	Vizsgálati eljárás	Követelmények
1.	A frissbeton légbuborék-tartalma (képzett levegő)	EN-480-1 szerinti III. referencia-beton	EN 12350-7	A vizsgálati keverék értéke $\geq 2,5$ térfogatszázalékkal nagyobb, mint az ellenőrző keveréké. A teljes levegőtartalom 4–6 térfogatszázalék. ^{b)}
2.	A megszilárdult beton légbuborék-jellemzői	EN-480-1 szerinti III. referencia-beton	EN 480-11c)	A vizsgálati keverékben mérve 30 perccel az adagolás után legalább az ellenőrző keverék kezdeti értéke.
3.	Nyomószilárdság	EN-480-1 szerinti III. referencia-beton	prEN 12390-3:1999	28 napos korra: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 75%-a.

a) Minden követelmény ugyanarra a vizsgálati keverékre vonatkozik.

b) A megfelelő adagolást általában nem lehet megadni, az adagolást úgy kell illeszteni, hogy a megkívánt légbuborék-tartalom kialakuljon.

c) Az EN 480-11 referenciaeljárásént érvényes. A távolsági tényező meghatározására más eljárásokat (pl. módosított pontszámláló eljárás) is szabad alkalmazni, ha bizonyítható, hogy azok lényegében ugyanazt az eredményt adják, mint az EN 480-11 szerinti eljárás.

2.24. táblázat. Kötésgyorsító adalékszerek kiegészítő követelményei
(azonos konzisztencia mellett)

Sorszám	Tulajdonság	Referenciabeton	Vizsgálati eljárás	Követelmények
1.	A kötési idő kezdete	EN-480-1 szerinti referenciabeton	EN 480-4	A vizsgálati keverék értéke $\leq 50\%$ -a az ellenőrző keverék értékének.
2.	Nyomószilárdság	EN-480-1 szerinti referenciabeton	prEN 12390-3:1999	28 napos korra: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 80%-a. 90 napos korra: a vizsgálati keverék értéke 28 napos korban.
3.	A frissbeton levegőtartalma	EN-480-1 szerinti referenciabeton	EN 12350-7	A vizsgálati keverék értéke ≤ 2 térfogatszázalékkal nagyobb, mint az ellenőrző keveréké, ha a gyártó mást nem ad meg.

2.25. táblázat. Szilárdulásgyorsító adalékszerek kiegészítő követelményei
(azonos konzisztencia mellett)

Sorszám	Tulajdonság	Referenciabeton	Vizsgálati eljárás	Követelmények
1.	Nyomószilárdság	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	prEN 12390-3:1999	20 °C-on és 24 óra után: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 120%-a. 20 °C-on és 28 nap után: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 90%-a. 5 °C-on és 48 óra után: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 130%-a.
2.	A frissbeton levegőtartalma	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	EN 12350-7	A vizsgálati keverék értéke ≤ 2 térfogatszázalékkal nagyobb, mint az ellenőrző keveréké, ha a gyártó mást nem ad meg.

2.26. táblázat. Kötéskésleltető adalékszerek kiegészítő követelményei
(azonos konzisztencia mellett)

Sorszám	Tulajdonság	Referenciabeton	Vizsgálati eljárás	Követelmények
1.	Kötési idő	EN-480-1 szerinti referenciahabarc	EN 480-4	Kezdetre: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értéke +90 perc. Vége: a vizsgálati keverék értéke legfeljebb az ellenőrző keverék értéke +360 perc.
2.	Nyomószilárdság	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	prEN 12390-3:1999	7 napos korra: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 80%-a. 28 napos korra: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 90%-a.
3.	A frissbeton levegőtartalma	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	EN 12350-7	A vizsgálati keverék értéke ≤ 2 térfogatszázalékkal nagyobb, mint az ellenőrző keveréké, ha a gyártó mást nem ad meg.

2.27. táblázat. Tömitő adalékszerek kiegészítő követelményei
(azonos konzisztencia vagy azonos víz-cement tényező mellett)^{a)}

Sorszám	Tulajdonság	Referenciabeton	Vizsgálati eljárás	Követelmények
1.	Kapilláris vízfelszívás	EN-480-1 szerinti referenciahabarc	EN 480-4	7 napos utókezelést követően 7 napig vizsgálva: a vizsgálati keverék értéke ≤ 50 tömeg-százaléka az ellenőrző keverék értékének. 90 napos utókezelést követően 28 napig vizsgálva: a vizsgálati keverék értéke ≤ 50 tömeg-százaléka az ellenőrző keverék értékének.
2.	Nyomószilárdság	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	prEN 12390-3:1999	28 napos korra: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 85%-a.
3.	A frissbeton levegőtartalma	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	EN 12350-7	A vizsgálati keverék értéke ≤ 2 térfogatszázalékkal nagyobb, mint az ellenőrző keveréké, ha a gyártó mást nem ad meg.

^{a)} Valamennyi vizsgálat elvégzésekor vagy a konzisztencia, vagy a víz-cement tényező legyen azonos.

2.28. táblázat. Kötéskésleltető mellékhatású képlékenyítő adalékszerek kiegészítő követelményei (azonos konzisztencia mellett)

Sorszám	Tulajdonság	Referenciabeton	Vizsgálati eljárás	Követelmények
1.	Nyomószilárdság	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	prEN 12390-3:1999	28 napos korra: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 100%-a.
2.	Kötési idő	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	EN 480-2	Kezdetre: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értéke +90 perc. Vége: a vizsgálati keverék értéke legfeljebb az ellenőrző keverék értéke +360 perc
3.	Vízigénycsökkentés	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	Roskadási mérték EN 12350-2 vagy területi mérték EN 12350-5	A vizsgálati keverékben ≤5% az ellenőrző keverékkel összehasonlítva.
4.	A frissbeton levegőtartalma	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	EN 12350-7	A vizsgálati keverék értéke ≤2 térfogatszázalékkal nagyobb, mint az ellenőrző keveréké, ha a gyártó mást nem ad meg.

2.29. táblázat. Kötéskésleltető mellékhatású folyósító adalékszerek kiegészítő követelményei (azonos konzisztencia mellett)

Sorszám	Tulajdonság	Referenciabeton	Vizsgálati eljárás	Követelmények
1.	Nyomószilárdság	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	prEN 12390-3:1999	7 napos korra: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 100%-a. 28 napos korra: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 115%-a.
2.	Kötési idő	EN-480-1 szerinti referenciahabarcs	EN 480-2	Kezdetre: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értéke +90 perc. Vége: a vizsgálati keverék értéke legfeljebb az ellenőrző keverék értéke +360 perc
3.	Vízigénycsökkentés	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	Roskadási mérték EN 12350-2 vagy területi mérték EN 12350-5	A vizsgálati keverékben ≤12% az ellenőrző keverékkel összehasonlítva.
4.	A frissbeton levegőtartalma	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	EN 12350-7	A vizsgálati keverék értéke ≤2 térfogatszázalékkal nagyobb, mint az ellenőrző keveréké, ha a gyártó mást nem ad meg.

2.30. táblázat. Kötéskésleltető mellékhatású folyósító adalékszerek kiegészítő követelményei (azonos konzisztencia mellett)

Sorszám	Tulajdonság	Referenciabeton	Vizsgálati eljárás	Követelmények
1.	A konzisztencia megtartása	EN-480-1 szerinti IV. referenciabeton	Roskadási mérték EN 12350-2 vagy területi mérték EN 12350-5	A vizsgálati keverékben mérve 60 perccel az adagolás után legalább az ellenőrző keverék kezdeti értéke.
2.	Nyomószilárdság	EN-480-1 szerinti IV. referenciabeton	prEN 12390-3:1999	28 napos korra: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 90%-a.
3.	A frissbeton levegőtartalma	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	EN 12350-7	A vizsgálati keverék értéke ≤ 2 térfogatszázalékkal nagyobb, mint az ellenőrző keveréké, ha a gyártó mást nem ad meg.

2.31. táblázat. Kötésgyorsító mellékhatású képlékenyítő adalékszerek kiegészítő követelményei (azonos konzisztencia mellett)

Sorszám	Tulajdonság	Referenciabeton	Vizsgálati eljárás	Követelmények
1.	Nyomószilárdság	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	prEN 12390-3:1999	28 napos korra: a vizsgálati keverék értéke legalább az ellenőrző keverék értékének 100%-a.
2.	Kötési idő	EN-480-1 szerinti referenciahabarcs	EN 480-2	20 °C-on: a vizsgálati keverék értéke ≥ 30 perc. 5 °C-on: a vizsgálati keverék értéke legfeljebb az ellenőrző keverék értékének 60%-a.
3.	Vízigénycsökkentés	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	Roskadási mérték EN 12350-2 vagy területi mérték EN 12350-5	A vizsgálati keverékben $\geq 5\%$ az ellenőrző keverékkel összehasonlítva.
4.	A frissbeton levegőtartalma	EN-480-1 szerinti I. referenciabeton	EN 12350-7	A vizsgálati keverék értéke ≤ 2 térfogatszázalékkal nagyobb, mint az ellenőrző keveréké, ha a gyártó mást nem ad meg.

2.32. táblázat. Az EN 934-2:2001 szerinti betonadalekszeres üzemű gyártásellenőrzésének legkisebb gyakorisága

Vizsgálatok	Képlek-nyitó adalekszer	Folyósító adalekszer	Stabilizáló adalekszer	Lég-buborek-képző adalekszer	Kötés-gyorsító adalekszer	Szilárdulásgyorsító adalekszer	Kötés-késleltető adalekszer	Tömítő adalekszer	Kötés-késleltető mellékhatású képlékenyítő adalekszer	Kötés-késleltető mellékhatású folyósító adalekszer	Kötés-gyorsító mel-lékhatású képlek-nyitó adalek-szer
Egyöntetűség, szín	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Relatív sűrűség (csak folyadékokra)	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Szokásos szárazanyag-tartalom	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
pH-érték (csak folyadékokra)	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Kloridtartalom (Cl ⁻) ¹⁾	4	4		4	4	4	4	4	4	4	4
Alkáli-tartalom	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Vízigény-csökkenés	A	A							A	A	A
Konzisztencia-növelés		A								A	
Konzisztencia-megtartás		A								A	
Kötési idő					A					A	A

2.32. táblázat (folyt.) Az EN 934-2:2001 szerinti betonadalekcszerek üzemi gyártásellenőrzésének legkisebb gyakorisága

Vizsgálatok	Képlékenyítő adalekcszer	Folyósító adalekcszer	Stabilizáló adalekcszer	Légbuborék-képző adalekcszer	Kötés-gyorsító adalekcszer	Szilárdulásgyorsító adalekcszer	Kötés-késleltető adalekcszer	Tömítő adalekcszer	Kötés-késleltető mellékhatású képlékenyítő adalekcszer	Kötés-késleltető hatású folyósító adalekcszer	Kötés-gyorsító melléhatású lékhatású képlékenyítő adalekcszer
A frissbeton levegőtartalma	1	1	1	A	1	1	1	1	1	1	1
Víziválás (vérzés)			A								
Légbuborék-tartalom a megszilárdult betonban (távolsági tényező)				1							
Nyomószilárdság	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kapillárisvízfelszívás								A			

A táblázatban lévő számok a gyártásra elosztott évenkénti vizsgálatok legkisebb gyakoriságát jelzik; ha a termelés kisebb gyakoriságú, akkor minden gyártási adagot meg kell vizsgálni.

A: vizsgálat 500 tonnánként, évente legalább 2 alkalommal.

B: vizsgálat gyártási adagonként.

1) Az összes klórtartalmat is ezzel a gyakorisággal kell megvizsgálni, ha az lényegesen eltér a klórtartalomtól. Megjegyzés: Az üzemi gyártás-ellenőrzési programba nem kell belefoglalni a hatékony alkotórész infravörös szinképezék (IR), valamint a kötési időre gyakorolt hatás vizsgálatát a legmagyobb ajánlott adagolás esetén. Ezeket az első típusvizsgálat alkalmával kell elvégezni.

2.5. A beton egyéb anyagai

2.5.1. Színező anyagok

Színező anyagokkal a betonokat és habarcsokat felületükön vagy teljes keresztmetszetükben színezni lehet. E célra olyan pigmentek vehetők számításba, amelyek nem lépnek reakcióba a cement szilárdulása során felszabaduló mésszel. Felhasználhatók: korom (fekete), vas-oxid (sárga, vörös, barna, fekete), króm-oxid (zöld), titán-dioxid (fehér). Adagolt mennyiségük a cement tömegére vonatkoztatva 2–10 m%.

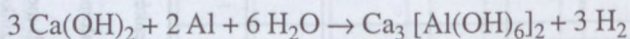
Feketén kívül csak úgy állíthatók elő színes betonok (habarcsok), ha fehércementet és világos színű adalékanyagot használunk. A színes betonok lehetnek egészen vagy részben színesek, pl. a látszóbeton panelok, beton idomkövek.

2.5.2. Elektromosan vezető anyagok

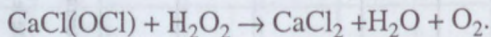
Feladatuk betonok és habarcsok vezetőképességének növelése és ezáltal pl. a beton fűtése, ill. az elektrosztatikus feltöltődés elvezetése. Ehhez használható adalékszer, pl. az acetilénkorom. Segítségével elektromosan vezető bevonatot is lehet készíteni.

2.5.3. Gázképzők, habképzők

Gázképzőket gázbeton előállításához és injektált habarcsok zsugorodásának a csökkentésére használnak. A gázképző rendszerint alumíniumpor vagy alumíniumpaszta, ill. hidrogén-peroxid. A pórusképződést alumíniumpor használata során a képződő hidrogén-gáz okozza, a



egyenlet szerint. Hidrogén-szuperoxid és klórmész használatakor a képződő oxigén-gáz okozza a következő egyenlet szerint:



A *habképzőket* általában habbetonok előállításához használják. Habképzőként szappanok (magasabb zsírsavak fémsoi) és szaponinok (növényi, vízben habzó glükózid-tisztítószer) ismertek.

2.5.4. Felületi kezelőszerek

Legalább 7 napig meg kell akadályozni, hogy a bedolgozott betonból a meg nem kötött víz elpárolgjon. Ezt a műveletet a *beton utókezelésének* nevezzük.

A párazáró felületi kezelőszerek (általában olajok, vizes emulziók és műanyag oldatok) használatának a célja a beton utókezelése védőbevonattal. Követelmény, hogy a felszórástól számított 14 napig összefüggő, egyenletesen záró védőbevonat keletkezzék, de azután fokozatosan tűnjön el. A párazáró szereket szórópisztollyal a felület mattá válásakor, azaz a betonozást követő 0,5–1 óra múlva kell felhordani a betonfelületre, és az oldalzsalu eltávolítása után az oldalfelületre is.

A *formaleválasztó anyagok* feladata, hogy megakadályozzák a beton és zsaluzat közötti kötést. Erre a célra rendszerint olajat használnak.

A *víztaszító hatás* fémszappanokkal, szilikonokkal és bitumenalapú anyagokkal (többnyire bitumenemulziók) érhető el. A betonfelületre felhordott víztaszító szerek rendszerint behatolnak a betonfelület kapillárisaiba, azt víztaszítóvá teszik, és növelik a beton vízzáróságát, jégolvasztó sókkal szembeni ellenállását.

A *felületi színezést* úgy lehet elérni, hogy a betonfelületet befestik, ill. hogy műgyantával kezelt színes homokszemcséket szórnak a felületre.

2.5.5. Kiegészítő anyagok

A kiegészítő anyagok a beton tulajdonságainak a javítására használt, a keverési folyamat során adagolt finomszemű anyagok. Ehhez magyarázat: rendszerint mind a folyami, mind a bányai eredetű adalékanyagokból hiányzik a finom homok. A péptelítettséget ilyen esetben vagy a cementtartalom növelésével, vagy kiegészítő anyag adagolásával lehet elérni.

Az MSZ 4798-1:2004 szabvány I. jelű (jó közelítéssel inert, a kémiai reakcióban részt nem vevő és II. jelű (puccolános vagy latens hidraulikus) típusú kiegészítő anyagot különböztet meg.

Hazánkban sem az I. típusú (a mészkőliszt kivételével), sem a II. típusú kiegészítő anyagot még nem vizsgálták meg, ezért csak akkreditált laboratóriumban végzett előzetes kísérletek alapján szabad felhasználni.

A szabvány a k-értékkel veszi számításba a kiegészítő anyagok hatását. A szabvány a II. típusú kiegészítő anyagokra (pernye, szilikapor) adott is meg számértékeket, de ezeket csak akkor szabad számításba venni, ha a hazai cementekkel végzett kísérletek alapján hazai szabványokban is megengedik.

3. A beton és vizsgálata

3.1. Az új betonszabvány

A könyv első kötetének írásakor az MSZ 4798-1:2004 Beton 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelés, valamint az MSZ EN 206-1 alkalmazási feltételei Magyarországon szabvány van érvényben.

A szabvány elsősorban alábbiakban tér el az előző szabványoktól:

- Kibővítették a beton osztályozási rendszerét, főleg a környezeti körülmények számításbavételével.
- Pontosították a tartóssági követelményeket.
- Bővítették a szilárdsági osztályokat.
- Bevezették a szilárdsági osztályokat a könnyűbetonokra.
- Figyelembe vették a kiegészítő anyagokat a víz–cement tényező és a cementtartalom meghatározásához.
- Pontosították a műszaki felelősség megosztását az előíró, a gyártó és a felhasználó között.
- Újraértékeltek a mérlegek pontosságát.
- Újraértékeltek az utókezelés követelményét.
- Ajánlásokat tettek a megfelelés értékelésére.
- Számos esetben megváltoztatták a vizsgálati módszereket.

3.2. Fogalmak

[Balázs (1984), MSZ 4798-1:2004]

A **beton** cementből, durva és finom adalékanyagból, valamint vízből készített anyag, amely tartalmazhat adalékszereket és kiegészítő anyagokat. Tulajdonságai a cement szilárdulása révén – a beton összetételétől, a bedolgozástól és az utókezeléstől függően – fejlődnek ki.

3.2.1. A frissbeton

A **frissbeton** a beton alapanyagainak olyan, építési célra készített keveréke, amelyen cementkötés még nem észlelhető és amelyet zsaluzatba még nem dolgoztak be. A friss betonkeverék a tömegével, ill. alkotóinak a tömegével vagy azok arányával jellemezhető, de egyértelmű térfogata, és így térfogat szerinti összetétele nincs.

A friss betonkeveréket a **keverési aránnyal jellemezzük**, amely az alkotók tömegeinek aránya a cement tömegéhez viszonyítva: lehet *tervezett* vagy *tényleges keverési arány*. Pl.

$$\frac{m_w}{m_c} : 1 : \frac{m_a}{m_c} = x : 1 : y$$

számpéldával:

$$0,5 : 1 : 6,16.$$

ahol m_w , m_c , ill. m_a a víz, a cement, ill. az adalékanyag tömegét jelenti kg-ban.

Az arányszámokat más sorrendben is fel szokták írni:

$$1 : y : x, \text{ pl. } 1 : 6,16 : 0,5.$$

A tervezett keverési arány a betontervezés végeredményeként keverési utasításnak is használható, de ez esetben az alkotók fajtáját is meg kell adni.

A **bedolgozott frissbeton** már jellemezhető a testsűrűségével és a minőség szerint megadott állapotú beton térfogategységére vonatkoztatott tömegével vagy térfogatával, azaz a **betonösszetétellel**.

Példa a betonösszetétel tömeg szerinti megadására, korábbi példa felhasználásával:

300 kg/m³ 350 kspc 20 (új jele: CEM II/A-S 32,5)

150 kg/m³ víz,

1850 kg/m³ száraz adalékanyag,

0,4% = 1,2 kg/m³ Plastol.

A frissbeton testsűrűsége: 2301 kg/m³.

Megkülönböztetünk tervezett és tényleges betonösszetételt.

A *tervezett betonösszetétel* a tervezett keverési arány és a tervezett (feltételezett) testsűrűség, ill. légtartalom alapján számított betonösszetétel.

A *tényleges betonösszetétel* a bedolgozott beton tényleges testsűrűségéből (továbbá esetleg a bedolgozott beton mért légtartalmából) és a tényleges keverési arányból számított betonösszetétel vagy a frissbeton szétmosási vizsgálatával megállapított tényleges összetétel.

A **víz-cement tényező** a tervezett, ill. a tényleges betonösszetételben a víz és a cement tömegének hányadosa, azaz:

$$x = \frac{m_w}{m_c}$$

A **keverővizet** a víz-cement tényezőből úgy számítjuk, hogy a belőle számítható vízmennyiségből levonjuk az adalékanyag víztartalmát (w_i) és hozzáadjuk az adalékanyag i idő alatti vízfelszívását ($w_{f,i}$), valamint a párolgási veszteséget (w_p). $w_{f,i}$ -n a beton megkeverése és bedolgozása közötti időben bekövetkező vízfelvételt és párolgási veszteséget értjük, tehát az elsősorban a transzportbetonra vonatkozik. $w_{f,i}$ a közetfajtától függ és félórás vagy 1 órás vízfelvétellel jellemezhető, kvarckavics adalékanyag rendszerint elhanyagolható.

A párolgási veszteséget a léghőmérséklet, a szélesebbesség, a szállítási körülmények és a szállítási idő függvényében vesszük fel. Zárt rendszerű szállítás esetén (keverőjárművel) nem kell számításba venni.

A keverővíz tehát:

$$w_k = m_c \cdot x + w_{f,i} + w_p - w_i$$

képletből számítható.

A **víz-levegő-cement tényező** (r) a bedolgozott frissbetonban lévő víz és levegő térfogatának (V_l , liter) és a cement tömegének (m_c , kg) a hányadosa, azaz:

$$r = \frac{V_w + V_l}{m_c} (1/\text{kg}).$$

A **bedolgozási tényező** (b) a beton előállításához felhasznált adalékanyag-frakciók külön-külön mért halmaztérfojtatai ($V_{h,ai}$) összegének és a belőle készített bedolgozott frissbeton térfogatának (V_b) a hányadosa:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n V_{h,ai}}{V_b}.$$

Ha az adalékanyag egy frakciójú, akkor **bedöngölési tényezőnek** nevezzük. A bedolgozási, ill. bedöngölési tényezőnek csak olyan munkahelyeken van jelentősége, ahol az adalékanyag-frakciót egyenként vagy az adalékkeveréket térfogat szerint adagolják. Ennek az előfordulása kicsi.

A **konzisztencia** a friss betonkeverék mozgékonyására, folyékonyására, a bedolgozási munkagényre jellemző szám, valamelyik szabványos konzisztenciamérő eszközzel való mérés eredménye. A konzisztencia a beton látszólagos bedolgozhatóságának leírására szolgál, és mérési módjai gyakran csak távolról közelítik meg a ténylegesen előforduló bedolgozási módokat. A konzisztencia-mérőszám a frissbeton folyékonyságának, mozgékonyságának bizonyos állapotát, illetőleg a folyékonyság hiányát adja meg.

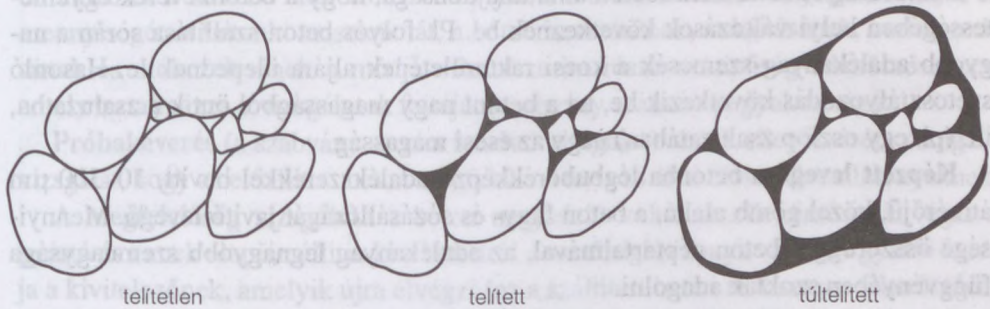
A **bedolgozhatóság** a frissbeton ama tulajdonsága, amely meghatározza egy adott beton, vasbeton vagy feszített vasbeton elem tömörítésének – pl. vibrálhatóságának – a könnyű vagy nehéz voltát. Befolyásolják: a beton összetétele, az adalékanyag legnagyobb szemnagysága, a szemek alakja, a betonkonzisztencia, a vasszerelés sűrűsége és a készitendő elem alakja, méretei, a zsalufalak távolsága és a hőmérséklet.

A megtervezett vagy táblázatból (előírásból) kivett keverési arányt mindig ellenőrizni kell **próbakeveréssel**. A próbakeveréssel egyrészt azt ellenőrizzük, hogy a bedolgozott frissbeton testsűrűsége egyezik-e a tervezett vagy előírt testsűrűséggel, másrészt azt, hogy a tervezett keverési arány lehetővé teszi-e a célnak megfelelő bedolgozhatóságot. Próbakeveréshez rendszerint 15 cm élhosszú kockasablont használunk.

A **péptelítettség** annak a mértéke, hogy a bedolgozott frissbetonban a cementpép az adalékanyag-váz hézagait milyen mértékben tölti ki: a beton akkor telített, ha egy

adott tömörítési módot alkalmazva a cementpép arra elegendő, hogy az adalékanyag-szemeket bevonja, és az adalékanyag-váz hézagait éppen kitöltse. Eszerint megkülönböztetünk (3.1. ábra):

- *telítetlen betont* (ha a cementpép kevesebb, mint amennyi az adalékanyag-váz kitöltéséhez szükséges),
- *telített betont* (ha a cementpép éppen annyi, amennyi az adalékanyag-váz kitöltéséhez szükséges),
- *túltelített betont* (ha a cementpép több, mint amennyi az adalékanyag-váz kitöltéséhez szükséges).



3.1. ábra. A péptelítettség szemléltetése

A telítetlen betonban légzárványok maradnak, a túltelített betonban az adalékanyag-szemcsék nem támaszkodnak egymásra, hanem úsznak a cementpépben. A légpórusképző adalékszer által létrehozott gömbszerű apró légbuborékok a cementpép térfogatát növelik, ilyen értelemben nem okoznak telítetlenséget (nem zárványok). Az adalékszer nélküli betonban 1,5–2 V% légtartalmat tételezünk fel (erre az esetre vannak kidolgozva a betontervezési segédletek), ezért a légtartalmat mérésel csak akkor kell ellenőrizni, ha a próbakeverési adatokból számított légtartalom a $V_{l, cal}$ V%-ot túllépi.

$$V_l = 0,1 \cdot 1000 - \left[\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_w}{1} + \frac{m_a}{\rho_{i,a}} \right] \cdot 0,1 \quad (\%),$$

ahol

$m_c, m_w,$ ill. m_a a próbakeveréskor bedolgozott beton tényleges cement-, víz- és adalékanyag-tartalma, kg/m^3 ;

$\rho_{i,a}$ az adalékanyag testsűrűsége, kg/m^3 ;

ρ_c a cement sűrűsége, kg/m^3 .

A péptelítettség struktúra jellemző [Balázs (1988), Ujhelyi (1988, 1997, 2005)].

A **frissbeton eltarthatósága** a keveréstől számított időtartam, amelynek elteltével a betonkeverékből vett próba

– konzisztenciája,

– a belőle készített, bedolgozott beton testsűrűsége és szilárdsága

legfeljebb csak a megengedett tőrésel különbözik a friss betonkeverékből (keverés után azonnal) nyert hasonló mérőszámoktól.

A **zöldszilárdság** a bedolgozott friss, földnedves beton ama tulajdonsága, amely a bedolgozás utáni azonnali kiszaluzást lehetővé teszi. Ez még nem szilárdság, hanem a frissbeton kohézióján és sűrűlődségén alapuló tulajdonság. A zöldszilárdságnak nagy szerepe van az előre gyártott elemek, pl. a betoncsövek gyártásában (állékonyág).

Ez a „nyomószilárdság” 0,35–0,45 víz–cement tényezőjű zúzottkő adalékanyagú beton esetében 0,2–0,5 MPa.

Szétosztályozódás a frissbeton ama tulajdonsága, hogy a betonkeverék egyenletességében helyi változások következnek be. Pl. folyós beton szállítása során a nagyobb adalékanyag-szemcsék a kocsi rakterületének aljára ülepednek le. Hasonló szétosztályozódás következik be, ha a betont nagy magasságból öntik a zsaluzatba, ill. (pl. egy oszlop zsaluzatában) nagy az esési magasság.

Képzett levegő a betonba légbuborékképző adalékszerekkel bevitt, 10–300 μm átmérőjű, közel gömb alakú, a beton fagy- és sózásállóságát javító levegő. Mennyisége összefügg a beton péptartalmával, az adalékanyag legnagyobb szemnagysága függvényében szokták adagolni.

Légzárvány a frissbetonban keletkezett olyan levegővel kitöltött üregek, amelyek nem szándékosan képeztek (pl. péptelítetlen, ill. rosszul bedolgozott beton).

A **vizsgálatra akkreditált laboratórium** a Nemzeti Akkreditáló Testület által valamely vizsgálatra (vizsgálatokra) elismert vizsgálo laboratórium. Vizsgálati bizonyítványt csak ilyen laboratórium adhat ki.

Az **építető** az építmény vagy az építményrész tervezését és/vagy kivitelezését megrendelő természetes vagy jogi személy, vagy jogi személyiséggel nem rendelkező társaság.

A **tervező** (a szabvány előírónak nevezi) az a személy, aki a beton műszaki feltételeit meghatározza és a tervezett beton jelét a terven fel is tünteti.

A **gyártó** a betont készítő személy vagy szervezet, napjainkban rendszerint betongyár.

A **kivitelező** (a szabvány szerint **felhasználó**) az a személy vagy szervezet, amely a frissbetont beépíti.

Tervezett beton olyan beton, amelynek a szükséges tulajdonságait és egyéb jellemzőit a gyártónak előírják.

Előírt, iparági beton a szabvány szerint olyan beton, amelynek szilárdsági jele legfeljebb C16/20 és amelynek összetételét a beton beépítése helyén érvényes iparági előírás adja meg.

Helyszínen kevert beton a beton felhasználója által, saját céljára az építés helyén előállított beton.

Transzportbeton a betonkeverő telepről a bedolgozás helyére – megfelelő eszközzel – (pl. mixerkeverő, kavarási kocsi) szállított beton.

A **mixerkocsi** önjáró alvázra szerelt betonkeverő gép, mely képes a betont szállítás közben is keverni.

Kavaróberendezés olyan önjáró alvázra szerelt berendezés, amely ugyan nem tudja a betont szállítás közben keverni, de képes a betont homogén állapotba tartani úgy, hogy minősége az átadásig ne változzék meg. Ilyen ma már alig van.

A **betontechnológus** a beton összetételéért, valamint a betongyártásért vagy bedolgozásért és utókezelésért felelős személy. Ő készíti a betontechnológiai, esetleg a minőség-ellenőrzési utasítást.

A **betontechnológiai utasítás** a betontechnológus által készített előírás, amely tartalmazza a tervező által előírt beton jelét, a felhasználandó anyagok fajtáját és mennyiségét, a betonkonzisztenciát, a beton keverésének, szállításának, bedolgozásának és utókezelésének a módját. Rendszerint része a minőség-ellenőrzési terv, amely tartalmazza a vizsgálatok fajtáját (szabvány számát) és gyakoriságát.

Próbakeverés (a szabvány szerint **kezdeti vizsgálat**) annak ellenőrzésére szolgáló vizsgálat, hogy az előállított beton megfelel-e a tervező által előírt követelményeknek.

A **megfelelőség vizsgálata** a beton megfelelő voltának ellenőrzése. Elvégzi a gyártó és ennek alapján állítja ki a betonról a minőségi bizonyítványt. A gyártó átadja a kivitelezőnek, amelyik újra elvégzi (ez a szállított beton rendszeres ellenőrzése) a megfelelőség vizsgálatát. Ezt saját ellenőrzésnek nevezzük akkor is, ha nem saját, hanem idegen, de akkreditált laboratóriummal végezteti el. Ezen kívül a beruházó is elvégeztetheti a beton megfelelőség vizsgálatát. Ezt idegen ellenőrzésnek nevezzük. Problémát okoz, ha nem a gyártó vagy a kivitelező szállítja a betont, mert a szállító felel azért, hogy a beton minősége szállítás közben ne változzék. Ez esetben szükség lehet még egy vizsgálat közbeiktatására.

3.2.2. A megszilárdult beton

Szilárd beton a cement kötése utáni állapotban lévő beton, amelynek már mérhető szilárdsági és egyéb tulajdonságai vannak.

Előre gyártott beton nem a végleges helyén készített és utókezelt beton.

Közönséges beton (röviden **beton**) olyan beton, amelynek a testsűrűsége kiszáritott állapotban $2000\text{--}2600\text{ kg/m}^3$ között van.

Könnyűbeton olyan beton, amelynek a testsűrűsége kiszáritott állapotban $800\text{--}2000\text{ kg/m}^3$ között van. A kis testsűrűséget rendszerint könnyű adalékanyagokkal érik el.

Nehézbeton olyan beton, amelynek a testsűrűsége kiszáritott állapotban legalább 2600 kg/m^3 . A kiszáritást $60\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékleten, tömegállandóságig kell végezni.

Nagyszilárdságú beton olyan beton vagy nehézbeton, amelynek a szilárdsági osztálya C50/60 jelűnél nagyobb, és olyan könnyűbeton, amelynek a szilárdsági osztálya LC50/55-nél nagyobb.

Igen nagy szilárdságú beton olyan beton, amelynek a szilárdsági osztálya legalább C100/115.

Betoncsalád a betonösszetételek olyan csoportja, amelyre a lényeges betontulajdonságok közötti megbízható összefüggést az MSZ EN 4798-1:2004 szerint megállapították és dokumentálták.

Használati élettartam az az időtartam, amely alatt a szerkezetbe épített beton – megfelelő karbantartást feltételezve – teljesítőképesége megmarad a szerkezet teljesítőképeségét kielégítő szinten.

A környezeti osztályok

A szabvány első helyre tette a környezeti hatásoktól függő környezeti osztályokat, mint a beton, a vasbeton és a feszített vasbeton tartósságát kifejező legfontosabb követelményt. A szerkezet környezeti osztályba sorolása az előíró (tervező) kötelessége.

A környezeti osztályokat a 3.1–3.3. táblázat tartalmazza. A környezeti osztályok jelölése (3.1. táblázat):

- XO nincs korróziós kockázat.
- XC karbonátosodás okozta korrózió.
- XD a nem tengervízből származó kloridok által okozott korrózió.
- XS tengervízből származó klorid által okozott korrózió.
- XF fagyás/olvadási korrózió jégolvasztó sóval vagy anélkül.
- XA kémiai korrózió.

A 3.3. táblázat szerint:

XN(H) és XO(H) nincs korróziós kockázat.

XF(BV–MI) [Beton- és Vasbetonépítési Műszaki Irányelv: fib Magyar Tagozata] fagyási/olvadási korrózió légbuborékképző adalékszer nélkül.

XK(H) koptatás okozta károsodás.

XV(H) igénybevétel víznyomás hatására.

A környezeti osztály jelét a beton jelében meg kell adni.

A nyomószilárdsági osztályok

A betont – a nyomószilárdsága alapján a 3.4. és a 3.5. táblázat szerint osztályozzuk. A táblázatokhoz az alábbi magyarázatot fűzzük:

C a közönséges, LC a könnyű- és HC a nehézbetonok jele. Az osztályozáshoz a 150 mm átmérőjű és 300 mm magas hengerek, vagy 150 mm oldalélű kockák 28 napos nyomószilárdságának jellemző (előírt) értékét kell használni. A szabvány a próbatetek 1 (legfeljebb 3) napig sablonban tárolást (nedvesen tartott ruhával letakarva), azt követően 28 napig 20 ± 5 °C hőmérsékletű víz alatti tárolást írt elő. Ez lényeges eltérés a korábbiakhoz képest. Hazánkban változatlanul 150 mm élhosszú kockákkal minősítik a betont és megengedik a vegyes tárolást (ahogy eddig volt), azaz 1 napos korig sablonban, utána 7 napos korig (20 ± 2) °C hőmérsékletű víz alatt, majd 28 napos korukig 20 ± 5 °C hőmérsékletű szobalevegőn.

Vízben tárolás esetén a vizes állapotban tört próbatest kisebb szilárdságnál megy tönkre, mint a vegyesen tárolt és légszáraz állapotban tört próbatest vegyes tárolásnál. Ez következik a tönkrementeli mechanizmusból. A kapott szilárdságot át kell számítani a vízben tárolt beton szilárdságára, vagy a mért értéket a vegyes tárolás esetén érvényes követelménnyel kell összevetni.

3.1. táblázat. Környezeti osztályok az MSZ EN 206-1 szabvány szerint

Az osztály jele	A környezeti hatás leírása	Tájékoztató példák a kitéti (környezeti) osztályok előfordulására
1. Nincs korróziós kockázat		
X0	Vasalás vagy beágyazott fém nélküli beton esetén: valamennyi környezeti körülmény, kivéve azokat, ahol fagyás/olvadás, koptatás, víznyomás vagy kémiai korrózió fordul elő. Vasbeton vagy beágyazott fémet tartalmazó beton esetén: nagyon száraz.	Vasalás nélküli, korrózióknak ki nem tett kitöltő és kiegyenlítő beton. Nagyon csekély, legfeljebb 35% relatív páratartalmú épületben lévő vasbeton.
2. Karbonátosodás okozta korrózió		
Ahol a vasalást vagy más beágyazott fémet tartalmazó beton ki van téve levegőnek és nedvességnek, ott a környezeti hatásokat a következők szerint kell osztályozni.		
XC1	Száraz vagy tartósan nedves	Csekély relatív páratartalmú épületben lévő beton. Állandóan víz alatt lévő beton.
XC2	Nedves, ritkán száraz	Hosszú időn át vízzel érintkező betonfelületek. Sokféle alaptest.
XC3	Mérsékelt nedvesség	Mérsékelt vagy nagy relatív páratartalmú épületekben lévő beton. Esőtől védett, szabadban lévő beton.
XC4	Váltakozva nedves és száraz	Víznek kitett betonfelületek, amelyek nem tartoznak az XC2 osztályba.
3. A nem a tengervízből származó kloridok által okozott korrózió		
Amikor a vasbeton vagy más beágyazott fémet tartalmazó beton kloridtartalmú vízzel érintkezik, beleértve a jégolvasztó sózást, akkor az igénybevételt a következők szerint kell osztályozni. MEGJEGYZÉS: A nedvességviszonyokat illetően lásd e táblázat 2. szakaszát is.		
XD1	Mérsékelt nedvesség	A levegőből származó kloridnak kitett, de jégolvasztó sóknak ki nem tett beton.
XD2	Nedves, ritkán száraz	Úszómedencék. Kloridot tartalmazó ipari vizeknek kitett, de jégolvasztó sóknak ki nem tett beton. Kloridtartalmú talajvízzel érintkező beton.
XD3	Váltakozva nedves és száraz	Kloridot tartalmazó permetnek kitett hídelemek. Járdák és útburkolatok. Autóparkolók földemei.

3.1. táblázat (folyt.) Környezeti osztályok az MSZ EN 206-1 szabvány szerint

Az osztály jele	A környezeti hatás leírása	Tájékoztató példák a kitéti (környezeti) osztályok előfordulására
<p>4. Tengervízből származó klorid által okozott korrózió</p>		
<p>MEGJEGYZÉS: Magyarországon csak különleges esetben használatos környezeti osztály, pl. amikor magyarországi tervező tengerparti országokba tervez (ir elő) vasbeton szerkezetet.</p>		
<p>Amikor a vasbeton vagy más beágyazott fémet tartalmazó beton tengervízből származó kloridnak vagy tengervízből származó sót tartalmazó levegőnek van kitéve, akkor a kitévelt a következők szerint kell osztályozni.</p>		
XS1	Sós levegőnek kitéve, de nincs közvetlen érintkezés a tengervízzel	Tengerparton vagy annak közelében lévő szerkezetek.
XS2	Állandóan tengervízbe merülve	Tengervízben épült szerkezetek részei.
XS3	Árapállal, felcsapódással vagy permettel érintkező zónák	Tengervízben épült szerkezetek részei.
<p>5. Fagyási/olvadási korrózió jégolvasztó anyaggal vagy anélkül</p>		
<p>Amikor a beton a fagyási/olvadási ciklusok által okozott jelentős igénybevételnek van kitéve nedves állapotban, akkor az igénybevételt a következőképpen kell osztályozni:</p>		
XF1	Mérsékelt víztelítettség jégolvasztó anyag nélkül	Függőleges betonfelületek esőnek és fagnak kitéve.
XF2	Mérsékelt víztelítettség jégolvasztó anyaggal	Útépítési szerkezetek függőleges betonfelületei, amelyek ki vannak téve fagnak és a levegő által szállított jégolvasztó anyag permetének.
XF3	Nagymérvű víztelítettség jégolvasztó anyag nélkül	Esőnek és fagnak kitétt vízszintes betonfelületek.
XF4	Nagymérvű víztelítettség jégolvasztó anyaggal vagy tengervízzel	Útburkolatok és hidpályalemezek jégolvasztó anyagoknak kitéve. Jégtelenítő anyagok közvetlen permetének és fagnak kitétt betonfelületek. Fagnak kitétt tengeri szerkezetek a felcsapódási zónában.
<p>6. Kémiai korrózió</p>		
<p>Amikor a beton ki van téve a természetes talajból és talajvízből származó anyagok kémiai korróziójának, ahogyan azt a 3.2. táblázat részletezi, akkor az igénybevételt a következők szerint kell osztályozni. A tengervíz osztályozása a földrajzi helyzettől függ, ezért a betonok felhasználási helyén érvényes osztályozást alkalmaznak.</p>		
<p>MEGJEGYZÉS: Egyedi vizsgálatok szükségesek az érvényes igénybevételi feltételekre akkor, ha</p> <ul style="list-style-type: none"> – a határok a 3.2. táblázaton kívül esnek; – az agresszív vegyi anyagok mások; – a talaj vagy a talajvíz kémiailag szennyezett; – a 3.2. táblázat szerinti vegyi anyagok esetén nagy vízáramlási sebesség van. 		

3.1. táblázat (folyt.) Környezeti osztályok az MSZ EN 206-1 szabvány szerint

Az osztály jele	A környezeti hatás leírása	Tájékoztató példák a kitéti (környezeti) osztályok előfordulására
XA1	Enyhén agresszív kémiai környezet a 3.2. táblázat szerint	
XA2	Mérsékeltén agresszív kémiai környezet a 3.2. táblázat szerint	
XA3	Nagymértékben agresszív kémiai környezet a 3.2. táblázat szerint	

MEGJEGYZÉS: Ez a szabvány nem foglalkozik sem az ipari, mezőgazdasági és lakossági szennyvizekkel, sem a kipufogó, illetve ipari gázokkal.

3.2. táblázat. Környezeti osztályok a természetes talaj és talajvíz kémiai korróziót okozó jellemző értékeitől függően

A következőkben osztályozott agresszív kémiai igénybevételek 5 °C és 25 °C közötti hőmérsékletű természetes talajokra, talajvizekre vonatkoznak, amikor a nyugalmi körülményeket megközelítő, elegendően lassú a vízáramlás.
Minden egyes kémiai jellemzőre a legveszélyesebb érték határozza meg az osztályt.
Ha két vagy több agresszív jellemző ugyanahhoz az osztályhoz vezet, akkor a környezeti hatást a következő magasabb osztályba kell sorolni, hacsak az adott esetre vonatkozó egyedi vizsgálat nem bizonyítja ezt szükségtelenné.

Kémiai jellemző	Referencia vizsgálati módszer	XA1	XA2	XA3
Talajvíz				
SO ₄ ²⁻ , mg/l	MSZ EN 196-2	≥200 és ≤600	>600 és ≤3000	>3000 és ≤6000
pH	ISO 4316	≤6,5 és ≥5,5	<5,5 és ≥4,5	<4,5 és ≥4,0
agresszív CO ₂ , mg/l	prEN 13577:1999	≥15 és ≤40	>40 és ≤100	>100 telítettség
NH ₄ ⁺ , mg/l	ISO 7150-1 vagy ISO 7150-2	≥15 és ≤30	>30 és ≤60	>60 és ≤100
Mg ²⁺ , mg/l	ISO 7980	≥300 és ≤1000	>1000 és ≤3000	>3000 telítésig
Talaj				
SO ₄ ²⁻ összes, mg/kg ^{a)}	MSZ EN 196-2 ^{b)}	≥2000 és ≤3000 ^{c)}	>3000 ^{c)} és ≤12000	>12000 és ≤24000
Savasság, ml/kg	DIN 4030-2	>200 Baumann Gully	A gyakorlatban nem fordul elő	

a) A 10⁻⁵ m/s átteresztőképesség alatti agyagtalajokat alacsonyabb osztályba szabad sorolni.

b) A vizsgálati módszer SO₄²⁻ sósavval való kivonását írja elő, alternatívaként vízzel való kivonás is használható, ha a beton alkalmazásának a helyén van erre tapasztalat.

c) A 3000 mg/kg határértéket 2000 mg/kg értékre kell mérsékelni, ha fennáll a szulfátonok felhalmozódásának a kockázata a betonban a száradás és a nedvesedés ciklikus változása vagy a kapilláris felszívás következtében.

3.3. táblázat. A 3.1. és 3.2. táblázatban meg nem jelölt, de Magyarországon még figyelembe veendő környezeti, illetve különleges igénybevételi osztályok (MSZ 4798-1)

Az osztály jele	A környezeti hatás leírása	Tájékoztató példák a környezeti osztályok előfordulására
1. Nincs korróziós kockázat		
XN(H)	Környezeti hatásoknak (nedvesség, karbonátosodás, kloridhatás, fagyás/olvadás, kémiai korrózió, koptatóhatás vagy víznyomás) nem ellenálló, szilárdsági szempontból alárendelt jelentőségű beton.	Korrózióknak ki nem tett, kis szilárdságú aljzatbetonok, beton alaprétegek.
XOb(H)	Vasalás vagy beágyazott fém nélküli beton esetén: valamennyi környezeti körülmény, kivéve azokat, ahol nedvesség, karbonátosodás, kloridhatás, fagyás/olvadás, kémiai korrózió, koptatóhatás vagy víznyomás fordul elő.	Vasalás nélküli, korrózióknak ki nem tett kitöltő és kiegyenlítő beton.
XOv(H)	Vasbeton vagy beágyazott fémeket tartalmazó beton esetén: valamennyi környezeti körülmény, kivéve azokat, ahol nedvesség, karbonátosodás, kloridhatás, fagyás/olvadás, kémiai korrózió, koptatóhatás vagy víznyomás fordul elő.	Legfeljebb 35% relatív páratartalmú száraz helyen lévő belső helyiségben vagy levegő hozzájutásától teljesen elzárt, száraz helyen lévő vasbeton esetén.
7. Koptatóhatás okozta károsodás		
Amikor a beton csiszoló, csúszó, gördülő, súrlódó igénybevételnek, ütésnek vagy vízáramlás által mozgatott gördülő hordalék koptató hatásának van kitéve, akkor az ezekből származó igénybevételt a következők szerint kell osztályozni.		
XK1(H)	Könnyű szemcsés anyagok koptató igénybevétele. Gyalogos forgalom, puha abroncsú kerekek koptató igénybevétele.	Könnyű adalékanyagok, termények stb. tárolására alkalmas silók, bunkerek, tartályok; járdák, lépcsők, garázspadozatok.
XK2(H)	Gördülő igénybevétel okozta koptatóhatás nehéz terhek alatt.	Betonút, durva, nehéz szemcsés anyagok tárolói, gördülő hordalékkal érintkező betonfelületek.
XK3(H)	Csúszató-gördülő igénybevétel okozta koptató hatás igen nehéz terhek alatt.	Repülőtéri kifutópályák, felszállópályák, nehézipari szerelőcsarnokok, konténerátrakó állomások.
XK4(H)	Csúszó-gördülő igénybevétel okozta koptatóhatás igen nehéz terhek alatt, nagy felületi pontosság és pormentesség igénye esetén.	Nehéz tehernek és targoncaforgalomnak kitett csarnokok és raktárak kemény felületű, pormentes ipari padlóburkolata.
Magyarországon a szilárd beton kopásállóságát a Böhme-módszer szerint kell vizsgálni.		

3.3. táblázat (folyt.) A 3.1. és 3.2. táblázatban meg nem jelölt, de Magyarországon még figyelembe veendő környezeti, illetve különleges igénybevételi osztályok (MSZ 4798-1)

Az osztály jele	A környezeti hatás leírása	Tájékoztató példák a környezeti osztályok előfordulására
8. Igénybevétel víznyomás hatására		
Amikor a beton ki van téve víznyomás hatásának, akkor az igénybevételt a következők szerint kell osztályozni:		
XV1(H)	Kis üzemi víznyomásnak kitett, legalább 300 mm vastag beton, amelynek felületén 24 óra alatt legfeljebb 0,4 liter/m ² víz szivárog át.	Pincefal, csatorna, legfeljebb 1 m magas víztároló medence, áteresztő, csapadékcsonk, záportároló, esővízgyűjtő akna.
XV2(H)	Kis üzemi víznyomásnak kitett, legfeljebb 300 mm vastag beton vagy nagy üzemi víznyomásnak kitett, legalább 300 mm vastag beton, amelyek felületén 24 óra alatt legfeljebb 0,2 liter/m ² víz szivárog át.	Vízépítési szerkezetek, gátak, partfalak, >1 m magas víztároló medence, föld alatti garázsok, aluljárók külső határoló szerkezetek, külön szigetelőréteg nélkül.
XV3(H)	Nagy üzemi víznyomásnak kitett, legfeljebb 300 mm vastag beton, amelynek felületén 24 óra alatt legfeljebb 0,1 liter/m ² víz szivárog át.	Vasbeton mélygarázsok, alagutak külső határoló szerkezetek, külön szigetelőréteg nélkül.
Magyarországon a szilárd beton vízzáróságát 3.4.4.3. fejezet szerint kell vizsgálni.		

3.4. táblázat. Nyomószilárdsági osztályok közönséges betonokra és nehézbetonokra

Nyomószilárdsági osztály	A legkisebb jellemző hengersizilárdság (A hengersizilárdság előírt jellemző értéke)	A legkisebb jellemző kockaszilárdság (A kockaszilárdság előírt jellemző értéke)
	$f_{ck, cyl}$ N/mm ²	$f_{ck, cube}$ N/mm ²
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

3.5. táblázat. Nyomószilárdsági osztályok könnyűbetonokra

Nyomószilárdsági osztály	A legkisebb jellemző hengersizilárdság (A hengersizilárdság előírt jellemző értéke)	A legkisebb jellemző kockaszilárdság ^{a)} (A kockaszilárdság előírt jellemző értéke) ^{a)}
	$f_{ck, cyl}$, N/mm ²	$f_{ck, cube}$, N/mm ²
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

a) Szabad használni más (előírt kockaszilárdsági jellemző) értékeket, ha ezek és a táblázatban megadott referencia hengersizilárdságok közötti összefüggést elegendő pontossággal megállapították és dokumentálták

3.6. táblázat. Nyomószilárdsági osztályok közönséges betonokra és nehézbetonokra, ha a 150 mm élhosszúságú próbakockákat vegyesen tárolták

Nyomószilárdsági osztály	A kockaszilárdság előírt jellemző értéke, ha a próbakockákat végig víz alatt tárolták	A kockaszilárdság előírt jellemző értéke, ha a próbakockákat vegyesen, azaz 7 napos korrig víz alatt, utána laboratóriumi levegőn, szárazon tárolták
	$f_{ck, cyl}$, N/mm ²	$f_{ck, cube, H}$, N/mm ²
C8/10	10	11
C12/15	15	16
C16/20	20	22
C20/25	25	27
C25/30	30	33
C30/37	37	40
C35/45	45	49
C40/50	50	54
C45/55	55	60
C50/60	60	65
C55/67	67	71
C60/75	75	79
C70/85	85	89
C80/95	95	100
C90/105	105	111
C100/115	115	121

3.7. táblázat. Kapcsolat a nyomószilárdság MSZ EN 4798-1 szabvány szerint előírt jellemző értéke és a nyomószilárdság 1982 előtti szabványos előírt átlagértéke között, közönséges betonok esetén

A beton e szabvány szerinti, végig víz alatt tárolt próbatesten meghatározott nyomószilárdságának előírt jellemző értéke $f_{ck, cyl}/f_{ck, cube}$ N/mm ²	A beton 1982 előtti szabványos, vegyesen tárolt, 200 mm élhosszúságú próbakockán mért nyomószilárdságának előírt átlagértéke $f_{m200, nom}$ N/mm ²
8/10	14
12/15	20
16/20	26
20/25	32
25/30	38
30/37	47
35/45	57
40/50	64

A vegyesen tárolt próbakocka ($f_{ck, cube, H}$) és a víz alatt tárolt próbakocka ($f_{ck, cube}$) jellemző értéke átszámítható az

$$f_{ck, cube, H} = \frac{f_{ck, cube}}{0,92}$$

képlettel. Ha a nyomószilárdsági osztály legalább C55/67, akkor a nevezőben 0,95 van. A nyomószilárdságok tárolástól függő jellemző értékét a 3.6. táblázat szemlélteti.

Az MSZ 4798-1:2004 tapasztalati átszámítási módot ad az 1982 előtti, 20 cm élhosszúságú, vegyes tárolású próbatestek átlagszilárdsága és e szabvány szerint a nyomószilárdság előírt jellemző értéke között (3.7. táblázat).

A német irodalom alapján további átszámítások is lehetségesek:

A vegyesen tárolt 100 mm és a vegyesen tárolt szabványos (150 mm) élhosszúságú próbakockák nyomószilárdsága előírt, jellemző értékének átszámítása a következő:

$$f_{ck, cube, H} = 0,97 \cdot f_{ck, cube, vegyes, 100}$$

Emiatt a csak 3 százaléknyi különbség miatt a német szakirodalom a gyakorlatban azonosnak veszi a 100 mm és a 150 mm élhosszúságú vegyesen tárolt próbakockákon mért eredményeket.

A vegyesen tárolt 200 mm és a vegyesen tárolt szabványos (150 mm) élhosszúságú próbakockák nyomószilárdsága előírt, jellemző értékének átszámítása a következő:

$$f_{ck, cube, H} = 1,05 \cdot f_{ck, cube, vegyes, 200}$$

A vegyesen tárolt 200 mm élhosszúságú próbakockák és a vegyesen tárolt szabványos (Ø150 × 300 mm) méretű próbahengerek nyomószilárdsága előírt, jellemző értékének átszámítása a következő:

C16/20 nyomószilárdsági osztályig:

$$f_{ck, cyl, vegyes} = 0,80 \cdot f_{ck, cube, vegyes, 200}$$

C20/25 nyomószilárdsági osztálytól:

$$f_{ck, cyl, vegyes} = 0,85 \cdot f_{ck, cube, vegyes, 200}$$

A vegyesen tárolt szabványos (150 mm) élhosszúságú próbakockák és a végig víz alatt tárolt szabványos ($\varnothing 150 \times 300$ mm) méretű próbahengerek nyomószilárdsága előírt, jellemző értékének átszámítása a következő:

$$f_{ck, cyl} = 0,75 \cdot f_{ck, cube, H}$$

A vegyesen tárolt 200 mm élhosszúságú próbakockák és a végig víz alatt tárolt szabványos (150 mm) élhosszúságú próbakockák nyomószilárdsága előírt, jellemző értékének átszámítása a következő:

$$f_{ck, cube} = 0,97 \cdot f_{ck, cube, vegyes, 200}$$

A vegyesen tárolt 200 mm élhosszúságú próbakockák és a végig víz alatt tárolt szabványos ($\varnothing 150 \times 300$ mm) méretű próbahengerek nyomószilárdsága előírt, jellemző értékének átszámítása a következő:

$$f_{ck, cyl} = 0,76 \cdot f_{ck, cube, vegyes, 200}$$

A két utóbbi összefüggésből adódik, hogy a végig víz alatt tárolt szabványos ($\varnothing 150 \times 300$ mm) méretű próbahengerek és a végig víz alatt tárolt szabványos (150 mm) méretű próbakockák nyomószilárdsága előírt, jellemző értékének átszámítása a következő:

$$f_{ck, cyl} = (0,76/0,97) \cdot f_{ck, cube} \sim 0,784 \cdot f_{ck, cube}$$

és ez közel megfelel a C70/85 nyomószilárdsági osztályig a közönséges betonok nyomószilárdsági jelében szereplő előírt jellemző értékek – a betonjel kerekítések miatti – 0,78–0,82 közötti hányadosának.

Jellemző szilárdság (nevezik **karakterisztikus szilárdságnak** is) az a szilárdság, amely a vizsgált betonmennyiségből a véletlen próbavétel elve alapján vett próbák szilárdságának legfeljebb 5%-a esik (nevezik 5% alulmaradási küszöbértéknek is).

Lehet **előírt érték**, amelyet a szabványos 28 napos nyomószilárdságra vonatkoztatnak. Jele $f_{ck, cyl}$ a 150 mm átmérőjű és 300 mm magas hengeren, ill. $f_{ck, cube}$ 150 mm élhosszú próbakockán.

Lehet **tapasztalati érték**, amelyet a vizsgálati eredményekből számítunk és $f_{ck, cyl, test}$ ill. $f_{ck, cube, test}$ a jele.

Minta a beton tulajdonságainak a vizsgálatára egy adagból vagy egy szállítmányból a minőség ellenőrzésére elkülönített, átlagos minőséget képviselő akkora betonmennyiség, amelyből egy vagy több vizsgálati próbatest készíthető, és amely elegendő a frissbeton tulajdonságainak a vizsgálatára is.

A nyomószilárdság egyedi értéke a nyomószilárdság vizsgálatára készített, egyetlen próbatest vizsgálatából kapott nyomószilárdság, vagy egy mintából készített, azonos korban vizsgált két, ill. több próbatest (általában 3 db) nyomószilárdságának az átlagértéke, amely egy vizsgálati eredménynek számít (jele: f_{ci}).

A nyomószilárdság átlagértéke adott minőségű, változatlan összetételű betonkeverékek folyamatos vagy szakaszos gyártásából kivett n számú próbatest egyedi nyomószilárdságának (f_{ci}) az átlaga.

Lehet előírt érték, az átlagszilárdság követelményértéke, amelynek jele $f_{cm, cyl}$ a 150 mm átmérőjű, 300 mm magas próbahengerre, ill. $f_{cm, cube}$ a 150 mm élhosszú próbakockára.

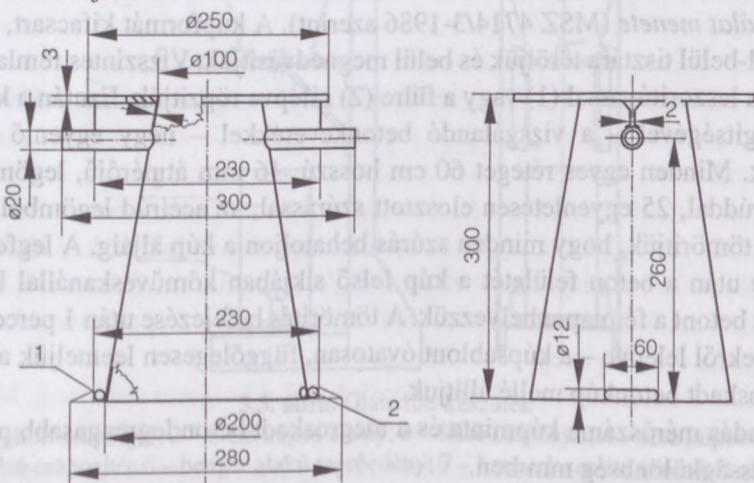
Lehet tapasztalati érték, nevezetesen a mérési eredményekből számított adat, amelynek jele $f_{cm, cyl, test}$ a 150 mm átmérőjű és 300 mm magas hengerre, ill. $f_{cm, cube, test}$ a 150 mm élhosszú kockára.

A nyomószilárdság tapasztalati szórása a

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (f_{ci} - f_{cm, test})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (f_{ci}^2 - n \cdot f_{cm, test}^2)}{n-1}}$$

képletből számítható. A tapasztalati szórás az elméleti szórásnak annál jobb közelítő értéke, mennél nagyobb a vizsgálati eredmények száma (n).

A matematikai statisztikai jellemzők – e szabvány értelmezésében – a szilárd beton próbasokaságra vonatkozó valószínűségi sűrűségfüggvény (relatív gyakorisági függvény), ill. eloszlásfüggvény állandói (pl. várható érték, elméleti szórás) és ezek származékai (pl. momentumok). A mintavétel, a mérés és a vizsgálat célja a minták jellemzői révén a minták szilárdsági vagy egyéb matematikai statisztikai jellemzőinek a becslése. A várható értéket a minták számtani átlagával, az elméleti szórást a minták tapasztalati szórásával becsljük.



3.2. ábra. Roskadámérő kúp. 1 – leszorítóvas; 2 – leszorító vasfal

A **terjedelem** vagy az egy mintára vonatkozóan a próbatestek legnagyobb és legkisebb szilárdságának a különbsége, vagy – több mintára vonatkozóan – a minták legnagyobb és legkisebb szilárdságvizsgálati átlagértékének a különbsége.

3.3. A frissbeton vizsgálata

A friss és a megszilárdult beton MSZ EN 206-1:2002 európai szabvány által előírt és most már kötelező vizsgálata eltér azoktól a szabványelőírásoktól, amelyek szerint korábban vizsgáltuk a betont és e könyvben ilyen adatokat adunk meg. Ezért mindkét vizsgálati módot ismertetjük, megadva az átszámítási lehetőséget is.

3.3.1. A frissbeton konzisztenciájának vizsgálata

A konzisztencia-mérőszám a gyárból szállított beton helyszíni átvételi feltételei között szerepel. Az MSZ 4714:3-1986 szabvány ötféle vizsgálati eszközt tekint szabványosnak, az MSZ EN 206-1:2002 szabvány csak négyfelét, de azok sem egyeznek meg teljesen. Mindegyiket először a régi, majd az új szabvány szerint ismertetjük.

3.3.1.1. A roskadásmérés

A legtöbb országban szabványosított konzisztenciamérő eszköz a **roskadásmérő kúp** (3.2. ábra). Ha $d_{\max} \leq 32$ mm, akkor méretei a 3.2. ábra szerintiék, ha $32 < d_{\max} \leq 63$ mm, akkor minden méretében másfélszeres méretekkel. A kúp falvastagsága 1,6 mm.

A *vizsgálat menete* (MSZ 4714/3-1986 szerint). A kúpformát kifacsart, vizes ruhával kívül-belül tisztára töröljük és belül megnedvesítjük. Vízszintes fémlapra állítjuk, majd a leszorítóvassal (1) vagy a fülre (2) rálépve rögzítjük. Ezután a kúpot töltőlappal segítségével – a vizsgálandó betonkeverékkel – négy egyenlő rétegben megtöltjük. Minden egyes réteget 60 cm hosszú, 16 mm átmérőjű, legömbölyített végű acélrúddal, 25 egyenletesen elosztott szúrással, az acélrúd legömbölyített végével úgy tömörítjük, hogy minden szúrással behatoljon a kúp aljáig. A legfelső réteg tömörítése után a beton felületét a kúp felső síkjában kőműveskanállal lehúzzuk. A lehúzott betont a fémlapra helyezük. A tömörítés befejezése után 1 perccel – a leszorító fülekről lelépve – a kúpsablont óvatosan, függőlegesen leemeljük a betonról és a megroskadt betonkúp mellé állítjuk.

A roskadás mérőszáma kúp minta és a megroskadt beton legmagasabb pontja közötti magasságkülönbség mm-ben.

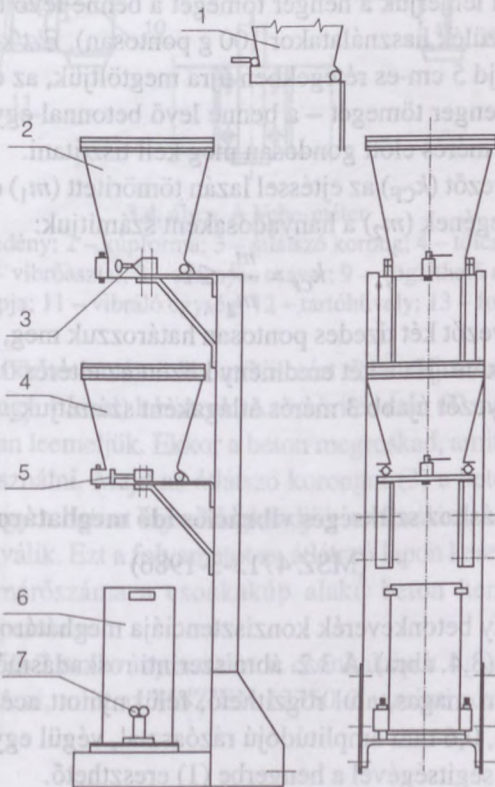
A roskadás mérőszámát 2 párhuzamos mérés számtani átlagaként számítjuk. Ha a két mérési eredmény az átlagtól 10%-nál jobban eltér, akkor a vizsgálatot 3 párhuzamos méréssel meg kell ismételni és az eredmények átlaga lesz a roskadás mérőszáma.

Ezzel a módszerrel csak a kissé képlékeny és annál lágyabb betonok konzisztenciája mérhető.

Az MSZ EN 12350-2 szabvány szerint a (200 ± 2) mm alsó, (100 ± 2) mm felső átmérőjű, (300 ± 2) mm magas csonkakúpot kell használni. A csonkakúpot három egyenlő rétegben kell betonkeverékkel megtölteni, és rétegenként 25 (összesen 75) szúrással kell tömöríteni.

3.3.1.2. A tömörödési tényező mérése

A tömörödési tényezőt (az MSZ 4713/3-1986 szerint a 3.3. ábra szerinti Glanville-készülékkel) vizsgáltuk.



3.3. ábra. Glanville-készülék

1 – nyitott csapóajtó; 2 – felső kúpos edény; 3 – felső csapóajtó; 4 – alsó kúpos edény;
5 – alsó csapóajtó; 6 – henger alakú mérőedény; 7 – hengerleszorító (mindkét oldalon)

A tömörödésmérés a beton bedolgozhatóságának azon az értelmezésén alapszik, hogy a beton bedolgozhatóságát az a belső munkamennyiség határozza meg, amely a beton tömörítéséhez szükséges.

Ezzel a módszerrel bármelyik betonkeverék konzisztenciája mérhető.

A 3.3. ábra szerinti készülék merev állványra rögzített, két, alul csapóajtóval ellátott tölcserből és az állványtalpon rögzíthető, egyébként elmozdítható, belül kerekített sarkú hengeres edényből áll. A 3.3. ábrán feltüntetett készülék hengerének űrtartalma 5 dm^3 és $d_{\max} \leq 32 \text{ mm}$ szemnagyságú betonok vizsgálatára alkalmas. Ha $d_{\max} \leq 63 \text{ mm}$, akkor 20 dm^3 űrtartalmú hengert kell használni. A vizsgálathoz a 3.3. ábra szerinti készülékbe 15 kg , a nagyobbikba 50 kg beton szükséges.

A vizsgálat menete. A vizsgálandó betonkeverékkel – magas peremű lapáttal – rázás és tömörítés nélkül, a felső kúpos edényt megtöltjük, majd a fölös részt vasvonalzóval lehúzzuk. Utána a csapóajtót kinyitjuk.

A beton átesik az alsó kúpos edénybe (4). Majd kinyitjuk annak a csapóajtóját (5) is és a beton átesik a hengerbe (6). A henger szintje feletti betont vasvonalzóval lehúzzuk. Ezt követően lemérjük a henger tömegét a benne lévő betonnal együtt 10 g pontosan (a nagy készülék használatakor 100 g pontosan). Ezt követően a hengerből kiöntjük a betont, majd 5 cm -es rétegekben újra megtöltjük, az egyes rétegeket gondosan tömörítve. A henger tömegét – a benne levő betonnal együtt – újra lemérjük.

A hengert minden mérés előtt gondosan meg kell tisztítani.

A tömörödési tényezőt (k_{CF}) az ejtéssel lazán tömörített (m_1) és a hengerbe erősen tömörített beton tömegének (m_2) a hányadosaként számítjuk:

$$k_{CF} = \frac{m_1}{m_2} \leq 1.$$

A tömörödési tényezőt két tizedes pontosan határozzuk meg, két párhuzamos mérési eredmény átlagaként. Ha a két eredmény között az eltérés $0,02$ -nél nagyobb, akkor a tömörödési tényezőt újabb 3 mérés átlagaként számítjuk.

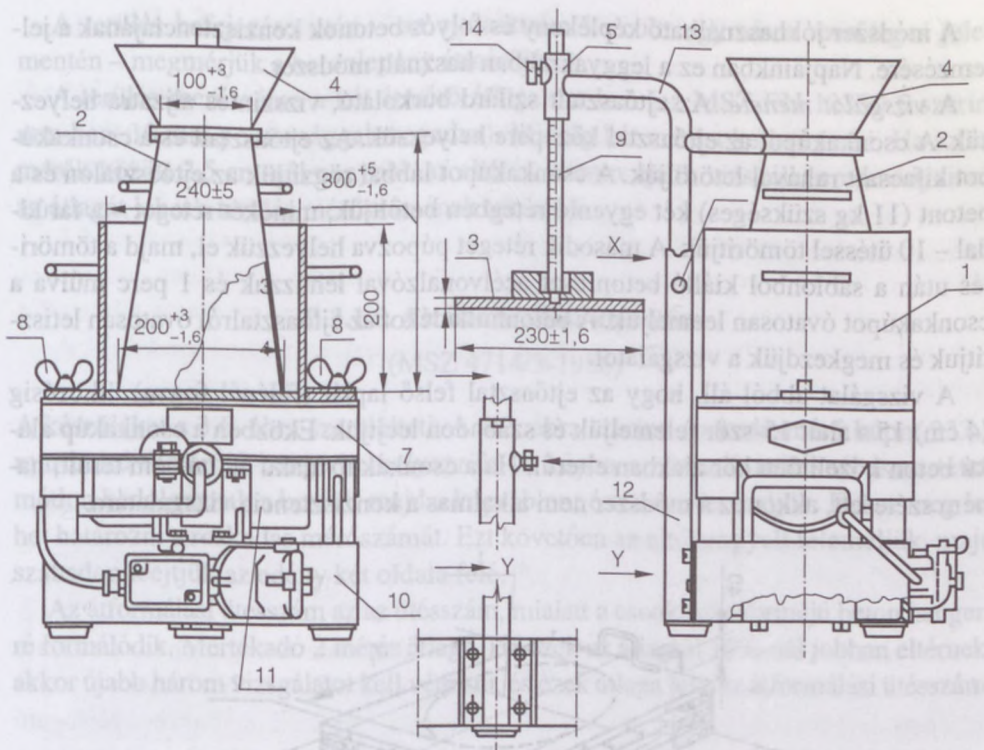
3.3.1.3. Az átformáláshoz szükséges vibrációs idő meghatározása Vebe-méterrel

(MSZ 4713-3-1986)

E módszerrel bármelyik betonkeverék konzisztenciája meghatározható.

A készülék részei (3.4. ábra). A 3.2. ábra szerinti roskadásmérő kúp, 240 mm belső átmérőjű, 200 mm magas, alul rögzíthető, felül nyitott acélhenger, 3000 fordulat/perc frekvenciájú, $0,6 \text{ mm}$ amplitúdójú rázóasztal, végül egy átlátszó korong (3), amely forgókar (13) segítségével a hengerbe (1) ereszthető.

A vizsgálat menete. A csonkakúpot (4) rögzítjük a hengeres edényben. Majd négy, kb. egyenlő rétegben megtöltjük betonnal. Ugyanolyan acélrúddal, 25 ütéssel tömörítjük, mint roskadás vizsgálata esetén. Arra kell vigyázni, hogy a döngölő acélrúd behatoljon az előző rétegbe.



3.4. ábra. A Vebe-méter

- 1 – henger alakú fémedény; 2 – kúpforma; 3 – átlátszó korong; 4 – tölcser; 5 – vezetőhüvely;
 6 – szorítócsavar; 7 – vibróasztal; 8 – szárnyas csavar; 9 – rögzíthető rúd mm-beosztással;
 10 – vibróasztal alapja; 11 – vibráló egység; 12 – tartóhüvely; 13 – forgókar; 14 – csavar

Az utolsó réteg tömörítése után a beöntőtölcsért eltávolítjuk, a tölcserből kiálló betont vakolókanállal (vagy mással) lehúzzuk. A tömörítés után 60 másodperccel a kúpformát a betonról óvatosan leemeljük. Ekkor a beton megroskad, amit konzisztencia mérőszámként fel lehet használni. Majd az átlátszó korongot (3) a beton megroskadott kúpja fölé engedjük úgy, hogy a betont érje. Megkezdjük a vibrálást, amit addig folytatunk, amíg a beton tömörre válik. Ezt a folyamatot az átlátszó lapon keresztül szemléljük.

A konzisztencia mérőszáma a csonkakúp alakú beton hengerré formálásához szükséges idő másodpercben.

Az MSZ EN 12350-3 szabvány szerint a csonkakúpot ugyanúgy kell betonnal megtölteni, és tömöríteni, mint az MSZ EN 12350-2 szerinti roskadásmérésnél.

3.3.1.4. A területmérés

A területvizsgálat eszköze egy ejtőasztal (3.5a ábra), egy csonkakúp (3.5b ábra) és a tömörítésre használt, 4×4 cm keresztmetszetű farúd.

A terület befejezése után – az ejtőasztalra karcolt, egymásra merőleges jelek mentén – megmérjük a betonlepeny átmérőjét.

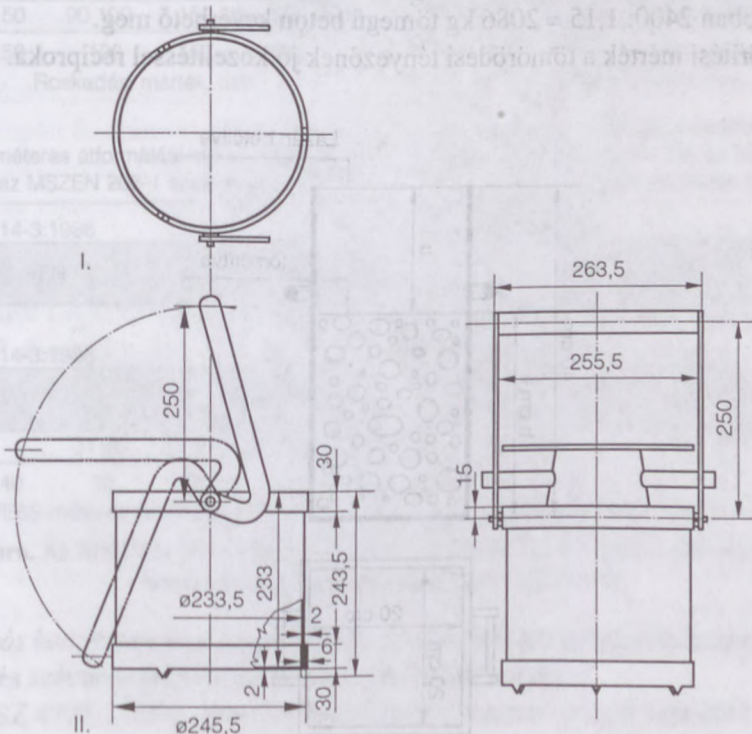
A terület mérőszáma a két átmérő átlaga cm-ben (az MSZ EN 12350-5 szerint mm-ben, 10 mm pontossággal megadva). Mindig két mérést kell végezni. Ha az átmérők között 2,5 cm-nél nagyobb az eltérés, három újabb vizsgálat eredményeinek az átlagát lehet a terület mérőszámának tekinteni.

3.3.1.5. Az átformálási ütőszám

(MSZ 4714/3-1986)

A készüléket a 3.6. ábra szemlélteti. A 3.2. ábra szerinti roskadásmérő kúpot 233,5 mm belső átmérőjű hengerbe helyezük. A kúpa a roskadásmérésnél ismertetett módon bedolgozzuk a betont, majd a kúpsablont óvatosan leemeljük. Ekkor meg lehet határozni a roskadás mérőszámát. Ezt követően az ejtőkengyelt felemeljük, majd szabadon leejtjük az edény két oldala felé.

Az átformálási ütőszám az az ütőszám, mialatt a csonkakúp formájú beton hengerre formálódik. Mértékadó 2 mérés átlaga. Ha ezek az átlagtól 10%-nál jobban eltérnek, akkor újabb három vizsgálatot kell végezni, és ezek átlaga lesz az átformálási ütőszám.



3.6. ábra. Az átformálási ütőszám meghatározására szolgáló készülék

Ez a módszer kissé képlékeny és ennél lágyabb betonok vizsgálatára alkalmas. Ennek megfelelő vizsgálat az új szabvány szerint nincs.

Az új szabvány és az ismertetett régi szerinti konzisztencia vizsgáló 3 eszköz: roskadásmérő, területszámoló, átfarmálási idő mérésére szolgáló azonos, csak kisebb eltérések vannak, pl. a roskadásmérés során a rétegszám és az összes szűrési szám eltér. A tömörödési tényező mérése helyett az egyszerűbb, a tömörítési mérték meghatározására szolgáló eszközt használják.

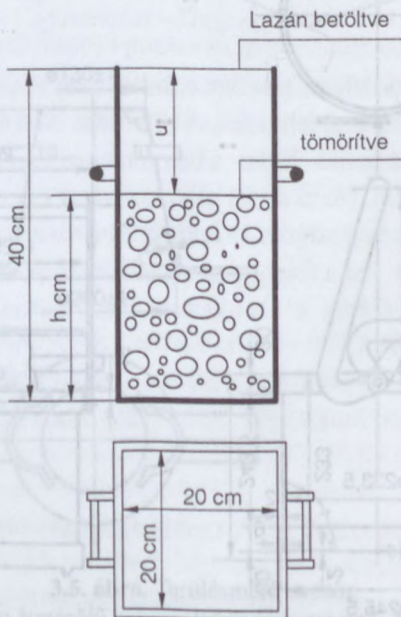
3.3.1.6. A tömörítési mérték

Az MSZ EN 206-1:2002 szabvány az MSZ EN 12350-4 szerinti *tömörítési mértéket* is használja a konzisztencia jellemzésére. Ehhez a Walz-féle vizsgáló eszközt használja (3.7. ábra). Míg a tömörödési tényező legfeljebb 1 lehetett, a Walz-szerinti tömörítés mértéke ennek a reciproka, azaz

$$c = \frac{40}{h} \geq 1,0.$$

Azt juttatja kifejezésre, hogy a laza állapotú frissbeton térfogata hányszorosa a betömörített frissbetonénak. Ha pl. a konzisztencia jele C2., és mérőszáma 1,15, és ha a bedolgozott friss beton testsűrűsége 2400 kg/m^3 , akkor 1 m^3 hasznos térfogatú keverő dobban $2400 : 1,15 = 2086 \text{ kg}$ tömegű beton keverhető meg.

A tömörítési mérték a tömörödési tényezőnek jó közelítéssel reciproka.



3.7. ábra. Vizsgálati eszköz a Walz-szerinti tömörítés méréséhez

3.3.1.7. A régi és az új konzisztenciaosztályok összehasonlítása

Az MSZ 4798-1:2004 szabvány a régi konzisztenciákat következőképpen definiálta:

Földnedves konzisztencia a keverékjellemzője annak a legszárazabb frissbetonnak, amely még elegendő összetartó képességű, szállítás közben nem pereg szét, amelyet csak intenzív tömörítő munkával lehet megfelelő tömörségűre bedolgozni.

A *kissé képlékeny konzisztencia* a földnedvesnél lágyabb frissbetonnak a keverékjellemzője, amely arra alkalmas járműben menet közbeni keverés nélkül is szétosztályozódás mentesen szállítható, de ehhez a tömörítés módját meg kell tervezni.

A *képlékeny konzisztencia* annak a frissbetonnak a keverékjellemzője, amelyet csak mixerkocsiban lehet szétosztályozódás mentesen szállítani és amelyet általában vibrátorral szabad tömöríteni.

Roskadási mérték az MSZ4714-3 és az MSZEN 206-1 szabvány szerint

MSZ4714-3:1986					
FN	KK	K		F	
20	40	41	100		
MSZ4714-3:1986					
S1	S2	S3		S4	S5
10	40	50	90	100	150 160 210 220
0	50	100	150	200	250

Területi mérték az MSZ4714-3 és az MSZEN 206-1 szabvány szerint

MSZ4714-3:1986					
FN	KK	K	F		
360	420	430	500		
MSZ4714-3:1986					
F1	F2	F3	F4	F5	F6
340	350	410	420	480	490 550 560 620 630
200	300	400	500	600	700 800

VEBE-méteres átfomálási idő az MSZ4714-3 és az MSZEN 206-1 szabvány szerint

MSZ4714-3:1986					
FN		KK	K	F	
50	21 20		8 7	3 2	
MSZ4714-3:1986					
V0		V1	V2	V3	V4
31 30		21 20	11 10	6 5	3
50	40	30	20	10	0

Az MSZ4714-3:1986 Glanville-féle tömörödési tényező reciproka (fenn) és az MSZEN 206-1 szerinti tömörítési mérték (lenn)

MSZ4714-3:1986					
FN		KK	K	F	
1/0,70	1/0,75	1/0,76	1/0,85	1/0,861	0,92 1/0,93
MSZ4714-3:1986					
C0		C1	C2	C3	
1,46 1,45		1,26 1,25	1,11	1,10	1,04
1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1 1,0

3.8. ábra. Az MSZ EN 206-1:2002 szabvány és az MSZ 4714-3:1986 szabvány szerinti konzisztenciaosztályok tájékoztató megfelelése

A *folyós konzisztencia* a nagyon lágy, de mozdulatlan helyzetében még víztartásra képes és szét nem üledő friss beton keverékjellemzője.

Az MSZ 4798-1:2004 szabvány a konzisztenciamérés módját betűjellel különbözteti meg, nevezetesen a roskadási mérték jele S, a területi mértéké F, az átfomálási

idő V , és a tömörödési mértéké C . A betűjel mellett számok fejezik ki a konzisztencia eltérését. A régi és az új konzisztenciaosztályokat a 3.8. ábrán szemléltettük.

3.3.2. A betonalkotók mennyiségének meghatározása

(MSZ 4714/2-1986)

3.3.2.1. A víztartalom meghatározása

Bárhonnan (álló betonkeverőgép, mixerkocsi, szállítószalag stb.) veszünk mintát, olyan legyen, hogy jellemezze a betont (véletlen jellegű).

A vizsgálatot a mintavétel után 5 percen belül meg kell kezdeni. Ha $d_{\max} \leq 32$ mm, akkor a betonkeverék legalább 2×5 kg, ha $d_{\max} > 32$ mm, akkor a betonkeverék legalább 2×10 kg legyen. Tömegét 10 g pontosan megmérjük, majd tömegállandóságig kiszáritjuk. (Tájékoztató vizsgálat esetén a szárítás végezhető denaturálszesz elégetésével.) A víztartalom a

$$w' = \frac{m_n - m_o}{m_o} \cdot 100$$

képlettel számítható, ahol

w' a minta víztartalma, m%;

m_n a minta tömege, g;

m_o a kiszáritott minta tömege, g.

Mértékadó a két minta átlagos víztartalma.

3.3.2.2. A testsűrűség meghatározása

A vizsgálat menete. 3 db, próbatestek készítésére alkalmas sablont megtisztítunk, belső oldalfelületét formaleválasztó anyaggal bekenjük, a szokványos tömörítéssel elkészítjük a próbatestet, a sablont a betonhulladéktól megtisztítjuk. A frissbeton testsűrűsége a

$$\rho_b = 1000 \frac{\bar{m}}{V}$$

képletből számítható, ahol

ρ_b a minta átlagos testsűrűsége, kg/m^3 ;

\bar{m} a 3 próbatest átlagos tömege, g;

V a 3 próbatest átlagos térfogata, m^3

Ehelyett a 3 próbatest testsűrűségét is átlagolhatjuk.

3.3.2.3. A cementtartalom meghatározása

A véletlen mintavétel elve alapján a frissbetonból 2-szer 5 kg mintát veszünk, majd 4,0 mm-es, utána 1,0 mm-es, végül 0,063 mm-es huzalszövetű, négyzetlyukú szitán folyóvízzel átmoszuk. A szitákon fennmaradó adalékanyagot tömegállandóságig kiszárítjuk. A minta tömegvesztesége a 0,063 mm-nél kisebb részek és a víz együttes mennyiségét adja, nevezetesen a

$$m_{0,063} = m_n - (m_{o,a} + m_w),$$

ahol $m_{0,063}$ a 0,063 mm-nél kisebb rész és a víz együttes mennyisége, g;

m_n a minta tömege, g;

$m_{o,a}$ a szitákon fennmaradt, kiszárított adalékanyag tömege, g;

m_w a 3.3.2.1. fejezet szerint meghatározott víztartalom, g.

Ha az adalékanyag 0,063 mm-nél kisebb része elhanyagolható, akkor az $m_{0,063}$ egyenlőnek vehető a cement tömegével. Ha az adalékanyag 0,063 mm-nél kisebb része nagyobb a cementtartalom 3%-ánál, akkor a cementtartalmat következő képletből számíthatjuk:

$$C = m_n - m_{oa} \cdot \frac{100}{100 - \varphi} - m_w,$$

ahol φ az MSZ 18288/1 szerint meghatározott, 0,063 mm-nél kisebb rész mennyisége az egész adalékalmazra vonatkoztatva, %.

3.1. példa. Továbbiakban arra az esetre mutatunk példát, ha φ nagyobb 3%-nál.

A betonból kivett minta tömege (m_n): 2500 g

Az iszapolt és szárított adalékanyag tömege (m_{oa}): 1960 g

Az adalékanyag 0,063 mm-nél kisebb része (φ): 3,8%

A minta víztartalma (m_w): 6,7%

$$C = 2500 - 1960 \cdot \frac{100}{100 - 3,8} - \frac{6,7 \cdot 2500}{100} = 295 \text{ g}.$$

A próbatetek segítségével kiszámítható 1 m³ betonban lévő cement mennyisége kg/m³-ben (C) az alábbiak szerint:

$$C = 2375 \cdot \frac{295}{2500} = 280 \text{ kg/m}^3$$

ahol ρ_b a friss beton testsűrűsége, kg/m³;

C a betonminta cementtartalma, kg vagy g;

m_n a minta tömege, kg vagy g;

C és m_n mértékegysége azonos legyen.

Példa: $\rho_b = 2375 \text{ kg/m}^3$;

C = 295 g;

$m_n = 2500 \text{ g}$

3.3.2.4. A víz–cement tényező számítása

A víz–cement tényező a vizsgált beton víz- és cementtartalmának a hányadosaként számítható:

$$\frac{m_w}{C}$$

ahol m_w a minta víztartalma, g;

C a minta cementtartalma, g.

3.2. példa. 167,5 g/dm³ (6,7 tömegszázalék) víztartalmú és 295 g/dm³ cementtartalmú beton víz–cement tényezője:

$$\frac{m_w}{C} = \frac{167,5}{295} = 0,568,$$

3.3.2.5. Az adalékanyag-tartalom kiszámítása

A betonminta adalékanyag-tartalma következő képletből számítható:

$$A = m_n - (m_w + C),$$

ahol A a minta adalékanyag-tartalma, g;

m_n a minta tömege, g;

m_w a minta víztartalma, g;

C a minta cementtartalma, g.

3.3.2.6. A légbuborék-tartalom meghatározása

[Balázs (1984)]

A frissbeton légpórus-tartalmának meghatározására szolgáló eljárások közül az ún. nyomásmódszer a leggyakoribb. Ez a Boyle–Mariotte-törvényen alapszik, amely szerint az ideális gáz p nyomásának és V térfogatának a szorzata állandó hőmérsékleten változatlan marad ($p \cdot V = \text{constans}$). Kis elhanyagolásokkal ezt a törvényt használják a frissbetonban lévő levegőre.

A vizsgálat során ismert térfogatú edénybe (3.9. ábra) ugyanúgy bedolgozzuk a betont, mint a készítendő szerkezetbe. Az edényt fedéllel lezárjuk (a ábra) és a beton és a fedő közötti teret megtöltjük vízzel (b ábra). A fedélen V_1 térfogatú nyomókamra van és azt megtöltjük p_1 nyomású levegővel. A szelep kinyitása után a p_1 légnyomás a vízen és betonon átadódva, összenyomja a betonban lévő (V_f) levegőt. Ezenközben a levegő összes térfogata $V_2 = V_1 + V_f$ mértékűre nő, míg a nyomása p_2 -re csökken (c ábra).

A számítás a következőképpen végezhető el:

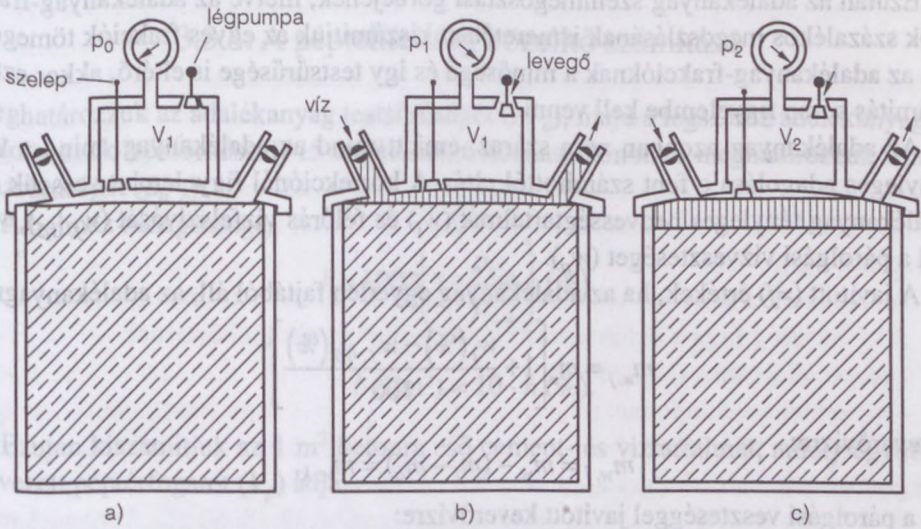
$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 = p_2 (V_1 + V_l) = p_2 \cdot V_1 + p_2 \cdot V_l,$$

$$V_l = \frac{p_1 \cdot V_1 - p_2 \cdot V_1}{p_2} = \frac{V_1 (p_1 - p_2)}{p_2}.$$

A légpórustartalom úgy számítható, hogy V_l térfogatot a beton (edény) térfogatára ($V = V_b$) kell vonatkoztatni:

$$V_l = \frac{V_l}{V_b} 100 \quad (V\%)$$

A készülékek számlapját V_1 , p_1 és V_2 ismeretében $V\%$ -ra kalibrálják.



3.9. ábra. A frissbeton pórustartalmának vizsgálata

3.3.3. A keverési arány számítása

[Balázs (1984)]

Betontervezésből ismertnek tekinthető a cement fajtája és mennyisége (m_c), az adalékanyag fajtája és a frakciók %-os tömegaránya, a d_{max} és az $x = m_w/m_c$. Ezek ismeretében a keverési arány többféleképpen számítható.

3.3.3.1. A keverési arány számítása az alapanyagok fizikai jellemzői ismeretében

A számítás menete a következő:

Kiszámítjuk a cement tömör térfogatát (V_c) és a víz térfogatát (V_w):

$$V_c = \frac{m_c}{\rho_c}; \quad V_w = m_c \cdot x = m_w.$$

Az adalékanyag testtérfogatát ($V_{t,a}$) 1 m³ beton térfogat szerinti összetételéből számíthatjuk, ha *feltételezzük* egy (V_l) levegőtérfogatot (0–15 liter, célszerűen 15 liter = 1,5 V%):

$$V_{t,a} = 1000 - (V_c + V_w + V_l).$$

Az adalékanyag tömege testsűrűségének ($\rho_{t,a}$) ismeretében:

$$m_a = \rho_{t,a} \cdot V_{t,a}.$$

Ezután az adalékanyag szemmegoszlási görbéjének, illetve az adalékanyag-frakciók százalékos megoszlásának ismeretében kiszámítjuk az egyes frakciók tömegét. Ha az adalékanyag-frakcióknak a minősége és így testsűrűsége is eltérő, akkor ezt a számítás során figyelembe kell venni.

Az adalékanyag azonban nem száraz, emiatt mind az adalékanyag, mind a víz tényleges adagolása a fent számítottól eltér. A korrekciónál figyelembe vesszük az adalékanyag tényleges nedvességtartalmát (w_i) és félórás vízfelszívását ($w_{f,0,5}$), végül a párolgási vízvesztéséget (w_p).

A javított (=j) értékek, ha az adalékanyag egyetlen fajtából áll, az adalékanyagra:

$$m_{a,j} = m_a \left[1 + \frac{w_i (\%) - w_{f,0,5} (\%)}{100} \right]$$

a keverővízre:

$$m_{w,j} = m_w - (m_j - m_a) = m_{w,k},$$

ill. a párolgási veszteséggel javított keverővízre:

$$m'_{w,k} = m_{w,k} + m_{w,p},$$

ahol $m_{w,p}$ értékét a megkevert és a bedolgozott beton víztartalmának a különbségként határozhatjuk meg.

Fenti számításhoz ismerni kell a cement sűrűségét (ρ_c) és az adalékanyag testsűrűségét. Az adalékszerek tömegét és térfogatát általában el lehet hanyagolni.

A megtervezett keverőarányt próbakeveréssel mindig ellenőrizni kell.

Próbakeveréskor mindig olyan betont kell készíteni, amely az építéskor bedolgozható beton konzisztenciájának felel meg. Esetleg csak több próbálkozás és újratervezés után kapunk megfelelő cement- és légtartalmú, alkalmas konzisztenciájú betont.

3.3.3.2. A keverési arány meghatározása a frissbeton testsűrűségének előzetes becslésével

E módszer kevesebb számolást igényel, de mindenképpen rosszabb, mint a 3.3.3.1. pont alatti, amely táblázatból fölvett adatokkal is számítható.

A bedolgozott beton testsűrűsége ($\rho_{t, b}$) egyenlő 1 m³ beton tömegével. Mivel a betontervezésből m_c és x ismert, az adalékanyag tömege számítható a következő képletből:

$$m_a = \rho_{t, b} - m_c - m_c \cdot x.$$

Ezt a tömeget osztjuk el az adalékanyag-frakciók arányában, majd a nedvességtartalom, vízfelszívás, párolgási veszteség miatti korrekciót az előbbi fejezet szerint számítjuk. Ezt követi a próbakeverés. Ha az elkészített beton testsűrűsége eltér a becsült testsűrűségtől, a mért testsűrűséggel a számítást meg kell ismételni.

3.3.4. A péptelítettség közelítő számítása

Meghatározzuk az adalékanyag testsűrűségét ($\rho_{t, a}$), majd a légszáras adalékanyagot bedolgozzuk (tömörítéssel) 15 cm élhosszú kockasablonba és meghatározzuk a halmazsűrűségét ($\rho_{h, a}$).

A halmaz hézagossága:

$$h = 1000 \left(1 - \frac{\rho_{h, a}}{\rho_{t, a}} \right) (\%),$$

ill.

$$h (l/m^3) = 10 \cdot h (\%).$$

Ezután kiszámítjuk az 1 m³ betonra eső cement- és víztartalmat, amely együtt a tervezett péptérfogatot (V_p) adja:

$$V_p = V_c + V_w = \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{w_i}{1,0} \quad (l/m^3).$$

Ha a betont légbuborékképző adalékszerrel készítjük, akkor az így képződő légtartalom a péptérfogatba beszámítandó.

Ha $V_p < h$, akkor a frissbeton telítetlen és a keverési arányt meg kell változtatni úgy, hogy

$$1,05 h \geq V_p \geq h$$

legyen. Ha $V_p > h$, akkor a beton túltelített. A tényleges telítettség erősen függ a beton tömörítési módjától.

A képletekben szereplő mennyiségek:

h a halmaz hézagossága, %, ill. l/m³;

$\rho_{t, a}$ az adalékanyag testsűrűsége, kg/m³;

ρ_{ha} az adalékanyag halmazsűrűsége, kg/m³;

V_p péptérfogat, l/m³;

V_c cement térfogata, l/m³;

V_w víz térfogata, l/m³;

- m_c cement tömege, kg;
- ρ_c cement sűrűsége, kg/m³;
- w_i adalékanyag víztartalma, l/m³.

A péptelítettséghez szükséges pépigény meghatározását zúzott adalékanyag esérére Zsigovics ismertette (1987).

3.4. A megszilárdult beton tulajdonságai és azok vizsgálata

3.4.1. A testsűrűség meghatározása

A bedolgozott frissbeton testsűrűsége függ a betonalkotók mennyiségétől és sűrűségétől, a beton víztartalmától, levegőtartalmától és a tömörítés mértékétől.

A testsűrűség adott mennyiségű megszilárdult beton tömegének és térfogatának az aránya kg/m³-ben.

Az ismertett módszer vonatkozik könnyű-, normál és nehézbetonokra egyaránt.

A testsűrűség függ a beton víztartalmától, ezért megkülönböztetünk

- átvett állapotban (légnedves),
- vízzel telített állapotban és
- kiszáritott állapotban

meghatározott testsűrűséget.

A vizsgálat menete. A mintadarab térfogata legalább 1 l, ill. 50 d_{max}^3 legyen. A minta tömegét aszerint határozzuk meg, hogy milyen állapotban vizsgáljuk. Átvett állapotban egyszerűen megmérjük 0,1% pontosan. A vízzel telítettnek akkor tekintjük a betont, ha a 20±2 °C hőmérsékletű vízben további tömegnövekedés már nem észlelhető. Ekkor a mintadarabot nedves ruhával letöröljük és megmérjük a tömegét. Kiszáritott állapotban vizsgált próbatestet – szárítás céljából – 105±5 °C hőmérsékletű szárítószekrénybe helyezük és addig tartjuk ott, amikor már tömegállandóság bekövetkezett. Ekkor lehűtjük és a tömegét megmérjük.

A próbatest térfogata meghatározható a méretekből hossz-méréssel, ha szabályos a próbatest. Szabálytalan próbatest térfogata meghatározható **hidrosztatikai lebegési módszerrel** (archimedesi mérleg). A vízzel telített próbatestet a 3.10a ábra szerint vízbe merítjük a felfüggesztő kosárral, majd a kosarat a próbatest nélkül. A próbatest testsűrűsége:

$$\rho_b = \frac{m_1 \cdot \rho_f}{m_1 - (m_3 - m_2)}$$

ahol ρ_f a víz sűrűsége, g/cm³;

m_1 a próbatest levegőn mért tömege, g;

m_2 a felfüggesztett kosár vízben mért tömege, g;

m_3 a próbatest és a felfüggesztett kosár vízben mért tömege, g.

Könnyűbetonok közelítő térfogatának a meghatározására is használható ez a módszer, ha a vízfelvétele 0,5%-nál kisebb, ill. ha a próbatest vízzel telített. Pontos mérésre is használható a módszer úgy, hogy a vízbe mártott próbatest pórusait előzetesen pl. paraffinnal lezárjuk. A paraffin térfogatát le lehet vonni, sűrűsége $0,90 \text{ g/cm}^3$ -nek tételezhető fel.

A próbatest térfogata meghatározható a 3.10b ábra szerinti edényben a vízkiszorítás elve alapján. A mérés során az edényt vízszintbe állítjuk és megtöltjük vízzel a kifolyó alsó szintjéig. A vízzel telített próbatestet óvatosan a folyadékba eresztjük és a kiszorított víz térfogata adja a próbatest térfogatát.

Porózus könnyűbeton próbatest (ha nem telítik vízzel) térfogata úgy is meghatározható, hogy a próbatest – vízbemerítés előtt 100°C hőmérsékletű paraffinba mártjuk addig, amíg a paraffin rétegvastagsága eléri az 1 mm-t. A próbatest testsűrűsége a

$$\rho_b = \frac{m}{V},$$

$$V = V_t - V_p,$$

$$V_p = \frac{m_p - m}{\rho_p}$$

képletből számítható, ahol

ρ_b a vizsgált beton testsűrűsége;

m a próbatest tömege a vizsgálatkori víztartalommal, a paraffinozás előtt, g/cm^3 ;

m_p a paraffinnal bevont próbatest tömege, g/cm^3 ;

V_t a paraffinnal bevont próbatest térfogata, cm^3 ;

V_p a paraffin térfogata, cm^3 ;

ρ_p a paraffin sűrűsége, $0,9 \text{ g/cm}^3$.

A szilárd beton testsűrűségét légszárász vagy kiszáritott állapotban kell mérni. Erre a célra a vízben tárolt nyomószilárdság vizsgálati próbatestek közvetlenül nem alkalmasak.

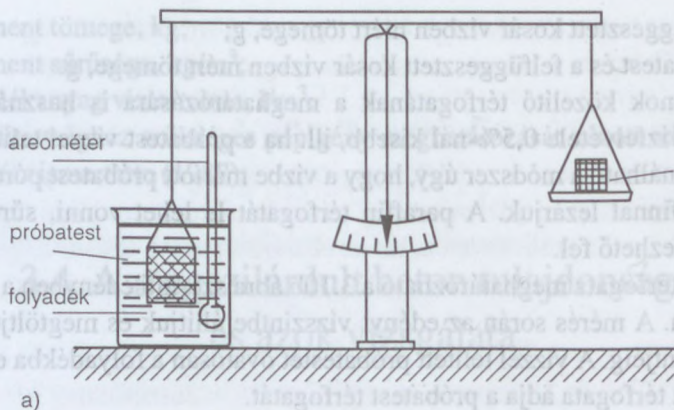
3.4.2. A nyomószilárdság vizsgálata

(MSZ 4715/4-1987, MSZ EN 12390-3)

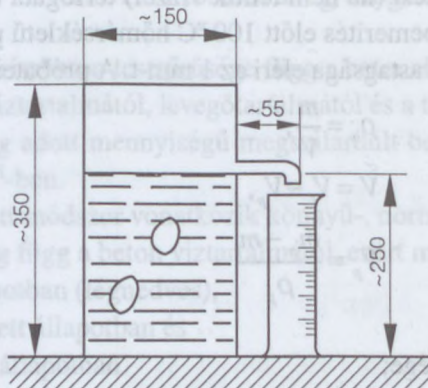
A nyomószilárdság általában a beton legfontosabb tulajdonsága.

A nyomószilárdság vizsgálatának esetei:

- Megfelel-e a betonkeverék a terven előírt követelményeknek? E célból a szerkezetbe épített betonkeverékből szabványos próbatesteket készítünk, azokat szabványosan tároljuk és rendszerint 28 napos korban szabványosan megvizsgáljuk.



a)



b)

3.10. ábra. A szabálytalan próbatess térfogatának meghatározása
a) hidrosztatikai lebegési módszerrel; b) vízkiszorítással

- Tájékoztató vizsgálat a beépített beton szilárdságáról szabványosan készített próbatessetek nyomóvizsgálata alapján. A próbatesseteket ebben az esetben a megépített szerkezetekkel azonos módon tároljuk.
- A szerkezetbe épített beton ellenőrzése a szerkezetből vett próbatessetek vizsgálata alapján.

Sablonban készített szabványos méretű próbatessetek:

- 150, 200, ill. 300 mm élhosszú kocka
- 150, 200, ill. 300 mm átmérőjű (d) és $2d$ magasságú henger.

A próbatessetek legkisebb mérete legalább a d_{\max} négyszerese legyen.

Ha a próbatesset a szerkezetből vett próbadarabból munkáljuk ki, akkor a legkisebb méret legalább d_{\max} háromszorosa legyen.

A próbatessetek készítése. Sablonban készített próbatessetek esetén a betonnal érintkező sablonfelületeket gondosan meg kell tisztítani és betonozás előtt a sablon felületét formaleválasztó anyaggal vékonyan és egyenletesen bekenni. A formaleválasztó ne lépjen reakcióba a betonnal. A próbatesset a beton kötése előtt, és a próbavételtől számított 20 percn belül be kell dolgozni. A betont úgy kell tömöríteni, hogy a pró-

batestek tömörsége a szerkezet betonjának a tervezett testsűrűségétől legfeljebb ± 50 kg/m^3 -rel térjen el. Célszerű tehát a bedolgozott frissbeton testsűrűségét (ρ_b) is meghatározni a

$$\rho_b = \frac{m}{V}$$

képlettel, ahol

ρ_b a testsűrűség, kg/m^3 ;

m a próbatest tömege, kg (a sablon tömegét megmérjük betonozás előtt, majd a betonnal együtt; a kettő különbsége a próbatest tömege);

V a próbatest térfogata, m^3 (sablontérfogat).

A szerkezetből úgy kell próbatestet venni (ill. kimunkálni), hogy az a szerkezet állékonyságát ne veszélyeztesse és acélbetétet lehetőleg ne tartalmazzon. Utóbbit úgy tudjuk rendszerint elérni, hogy vaskereső műszerrel megkeressük a beépített acélbetéteket és helyüket krétával a beton felületére rajzoljuk. A próbatestet lehetőleg magmintafúróval vegyük. Átmérője ne legyen 50 mm-nél kisebb.

Az előírt betonszilárdság ellenőrzésére készített próbatestek vegyes tárolásán azt értjük, hogy 1 napos korig 20 ± 3 °C hőmérsékletű térben sablonban, majd 7 napos korukig 20 ± 3 °C hőmérsékletű mésztelített vízben vagy legalább 95% páratartalmú térben, végül a vizsgálatig 20 ± 5 °C hőmérsékletű, legalább 55% rel. légnedvességű térben kell tárolni. Szállításkor a próbatesteket meg kell védeni a sérülésektől. A szerkezetből vett próbatest lehet fűrt magminta vagy kivésett betontömb. A betontömbből szabályos próbatestet fűrészelünk. Majd mind a fűrt, mind a fűrészelt próbatest nyomott lapjait habarcssimítással párhuzamossá tesszük, majd így (légnedves állapotban) vizsgáljuk. A szilárdságvizsgálat eredményeit végül átszámítjuk a szabványos méretű és állapotú, 28 napos korú próbatest szilárdságára.

Olyan *törőgépet* szabad használni, amelyeknek legalább az egyik nyomólapja gömbcsuklós. Minden törőgép egy próbatestméret vizsgálatára képeznek ki (pl. 15 cm élhosszú kocka). Ha a próbatest mérete ettől eltér, akkor nő a szórás és csökkenhet a szilárdság. Ezt a hibát azáltal küszöbölhetjük ki, ha a próbatest és a nyomólap közé ún. próbatesthez illesztett gömbcsuklót helyezünk [Zsigovics (1988)].

A minősítő vizsgálatra használt törőgépet – az MSZ 104 előírásai szerint – hitelesíttetni kell az Országos Mérésügyi Hivatallal. Az erő mérési pontossága legalább 3% legyen (MSZ 4715/4-1987).

A törővizsgálatra a próbatestet elő kell készíteni. A próbatestek nyomott lapjai legyenek párhuzamosak és síkok. Ezt szükség szerint a nyomott lapok csiszolásával vagy simításával kell elérni. Leggyakoribb a cementhabarcs-simítás, amelynek az összetétele: 50 m% portlandcement +50% 1 mm-nél kisebb szemcseméretű kvarchomok. Ez 10 mm vastagságig nem rontja a szilárdságot. Hátránya, hogy 1 hétig szilárdulnia kell. Ha 1 napon belül szükség van a törővizsgálatra, akkor gipszsimítást vagy kvarclisztartalmú kénsimítást alkalmazhatunk. A réteg ne legyen 3 mm-nél vastagabb. A tapasztalat szerint az olvasztott kénnel simítás növeli a vizsgálati szórást a cement-

habarccsal és gipsszel simított próbatetekéhez képest. Az eltérés kis szilárdság ($\leq C16$) esetén kevés.

A törőgéphez a próbatestet központosan kell elhelyezni. Ezt elősegítik az alsó nyomólapra karcolt körök, átlók és próbatestméret.

Ha a próbatestet a vizsgálat előtt vízben tárolták (MSZ EN 12390-2), akkor a próbatest felületéről, de különösen a nyomólapokról a vizet le kell törölni. Vizsgálni akkor szabad, ha a nyomólapok mattulni kezdenek. Ugyanis minden, ami csökkenti a nyomólapon a súrlódást, az egyben csökkenti a törőerőt is.

A kocka alakú próbatestet a bedolgozás irányával merőlegesen, a henger alakút a bedolgozás irányával párhuzamosan kell terhelni.

Ha a törőgéphez többféle mérés határa van, akkor azt kell választani, amelyiknél a felső harmadba esik a várható törőerő.

A terhelés sebességét egyenletesen kell növelni a törésig. Az ajánlott terhelési sebesség könnyű betonok vizsgálata során 2 ± 1 MPa/s, a többi betonacél 4 ± 1 MPa/s. Minél nagyobb sebességgel terheljük a betont, annál nagyobb lesz a törőerő, ami nem engedhető meg.

A szilárdságot úgy számítjuk, hogy a törőerőt osztjuk a terhelt felülettel, azaz

$$f_{ci, cube} = \frac{F}{A},$$

ahol $f_{ci, cube}$ a beton nyomószilárdsága kockán, N/mm²;

F a törőerő, N;

A a próbatest nyomott felülete, mm².

A nyomószilárdság jellemző értékét az MSZ 4720-2 szerint

$$f_{ci, cube, test, H} = f_{cm, cube, test} - k \cdot t \cdot s$$

képletből kell meghatározni, ahol

$f_{ck, cube, test, H}$ a nyomószilárdság jellemző értéke, MPa,

$f_{cm, cube, test}$ az átlagos nyomószilárdság, MPa (vegyes tárolás esetén),

k a szilárdság eloszlásától függő tényező (3.8. táblázat),

t a próbatestek darabszámától függő tényező (3.9. táblázat),

s a nyomószilárdság szórása, MPa.

A beton akkor megfelelő, ha

$$f_{ck, cube, test, H} \geq f_{ck, cube, H}$$

ahol $f_{ck, cube, H}$ a szilárdság minősítési (előírt jellemző) értéke (3.5. táblázat) vegyes tárolás esetén.

A kocka akkor törik szabályosan, ha a 3.11a ábra szerinti kettős kúpos törés következik be. A törés – nyomó-igénybevétel esetén is – azáltal jön létre, hogy nyomásra keresztirányban alakváltozik, és kimerül a beton nyúlóképessége. Ugyanis a 3.11a ábra szerinti töréskép azért alakulhat ki, mert a törőgép nyomólapjai közvetlenül érintkeznek a próbatesttel, és a köztük fellépő súrlódás meggátolja a keresztirányú nyúlást a

nyomólapok mentén. A nyomólapok környezetében háromtengelyű feszültségállapot alakul ki. A legnagyobb nyíróigénybevétel a gátolt és a nem gátolt alakváltozás területe közötti határon lép fel és ott csúszótörést hoz létre. Emiatt a kis kocka szilárdsága nagyobb, mint a nagy kockáé (3.11b ábra). Az azonos alapterületű, de különböző ma-

3.8. táblázat. A szilárdság eloszlásától függő k tényező (MSZ 4720-2:1980)

Átlagos nyomószilárdság MPa	5	7	10	14	20	28	40	56
k	0,77	0,81	0,87	0,92	1,00	1,08	1,19	1,31

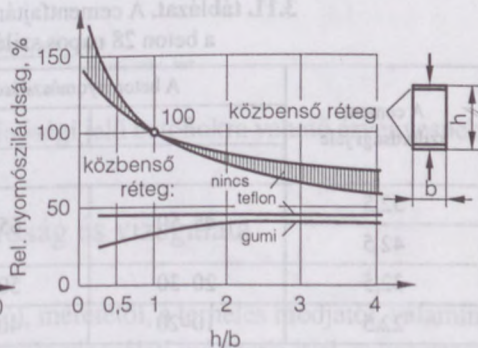
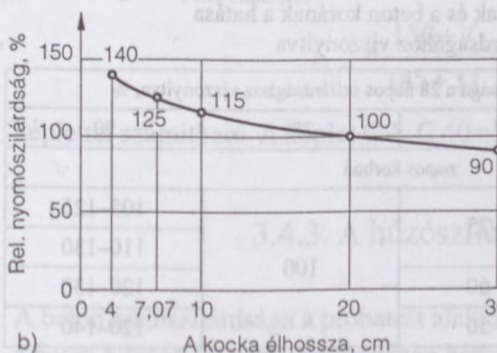
3.9. táblázat. A próbatetek számától függő t tényező (MSZ 4720-2:1980)

A próbatest száma n	3	10	12	14	16	18	20	25	30	40	>40
t	2,28	1,79	1,77	1,75	1,73	1,72	1,71	1,70	1,69	1,68	1,645



a) a kocka törésképe

a magasság hatása a törésképre



3.11. ábra. Kőszertű anyagok nyomószilárdsága

a) kocka törésképe; b) a kocka élhosszának a hatása a nyomószilárdságra;

c) a hasáb magasságának, valamint a nyomólapok és a próbatest közötti súrlódásának a hatása a nyomószilárdságra

gasságú próbatesteknek annál nagyobb a szilárdsága, minél kisebb a magassága (3.11c ábra). Ha a próbatest magassága az alapélének legalább a háromszorosa, akkor a próbatest középső részén a súrlódás gátló hatása már nem érvényesül.

Továbbá, ha a nyomólapokon csökken a súrlódás, akkor csökken a keresztirányú nyúlást gátló hatás. Ez a körülmény úgy hat, mintha a h/b arány nőne (3.11c ábra). Ha a nyomólap és a próbatest közötti réteg poli(tetrafluor-etilén), másnéven Teflon, akkor a keresztirányú nyúlás a próbatest teljes magassága mentén azonos és a próbatest – töréskor – függőleges repedések mentén esik darabokra (szakadó törés). Ugyanis a Teflon súrlódási tényezője a legkisebb anyagaink között.

Ezért nagyon figyelni kell a törővizsgálatra.

Ha a szilárdságot nem a szabványos próbatesten ($\varnothing 15/30$ cm méretű henger, 15 cm élhosszú kocka) határoztuk meg, akkor – az alak és méret figyelembevételével – a szilárdságot át kell számítani a szabványos próbatest szilárdságára.

A víztartalom hatását a 3.12. ábra szemlélteti. Ugyanis a víz összenyomhatatlan, tehát növeli a keresztirányú nyúlást. A 28 napos beton MSZ 4713/3 szerint meghatározott víztartalma (w%) ismeretében a szilárdság átszámítható a légnedves állapotú beton szilárdságára (3.10. táblázat).

A nyomószilárdság lényegesen függ a cementfajtától és a beton korától. Az átszámítás a 3.11. táblázat szerint lehetséges. Az átszámítás következő betonra érvényes: 300 kg/m³ cement, 0,6 víz–cement tényező, 6,0 finomsági modulus, adalékszer nincs.

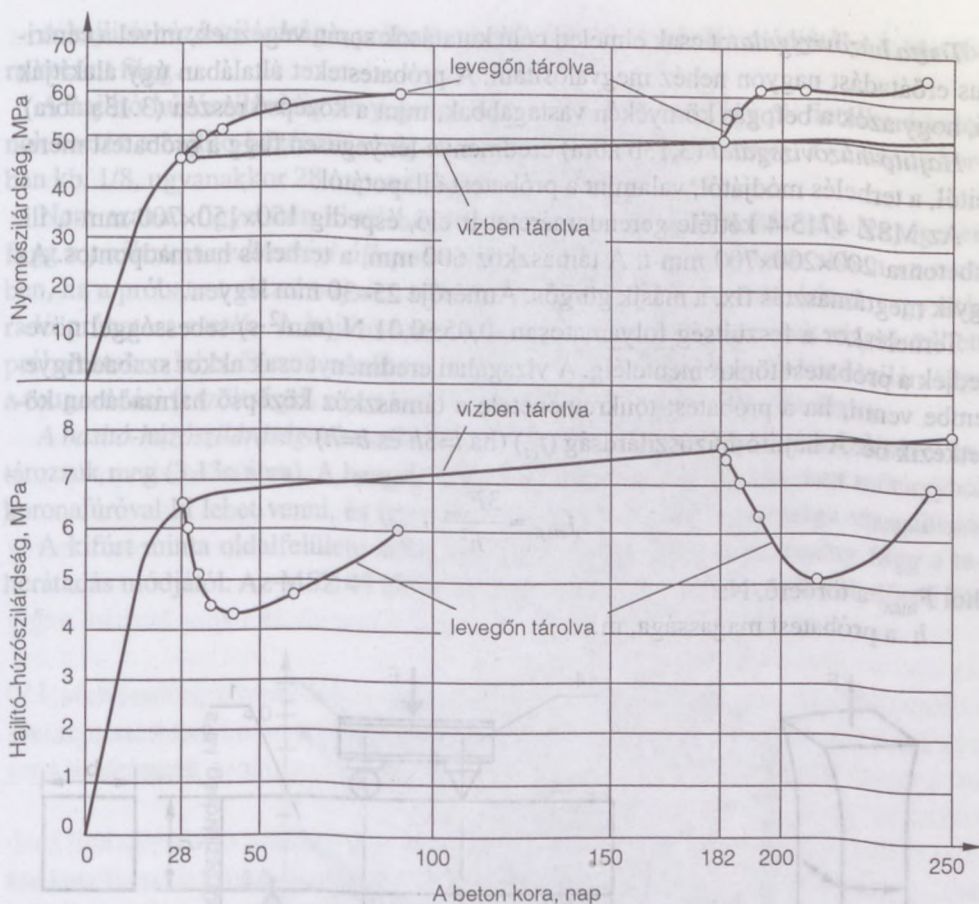
3.10. táblázat. A szilárdság korrigálása a próbatest víztartalom függvényében

Próbatest víztartalma, w%	0	1,5	3	4,5	6
A nyomószilárdság viszonyszáma, %	108	100	92	84	76

3.11. táblázat. A cementfajtának és a beton korának a hatása a beton 28 napos szilárdságához viszonyítva

A cement szilárdsági jele	A beton nyomószilárdsága a 28 napos szilárdsághoz viszonyítva, %			
	2	7	28	90
	napos korban			
52,5	45–50	65–75	100	105–125
42,5				110–130
32,5	20–30	50–60		120–130
22,5	10–20	40–50		120–140

Vasbeton, ill. feszített vasbeton szerkezetekben a beton szilárdsága nem egyezik meg a kockaszilárdsággal, hanem a *hasáb-* vagy *prizmaszilárdsággal* szokás azonosnak venni. A szabványos hasáb alapterülete a kockáéval egyezik meg, magassága



3.12. ábra. A tárolás hatása a beton nyomó- és hajlító-húzószilárdságára

annak a háromszorosa. *Gvozgyev* kísérletei szerint a hasábszilárdság ($f_{c, pr}$) a kockaszilárdságból ($f_{cm, cube, test}$)

$$f_{c, pr} = \frac{130 + f_{cm, cube, test}}{145 + 3f_{cm, cube, test}} \cdot f_{cm, cube, test}$$

képlettel számítható. A képlet C 4–C 40 minőségű jelű betonokra vehető érvényesnek.

3.4.3. A húzószilárdság és vizsgálata

A beton húzószilárdsága a próbatest alakjától, méretétől, a terhelés módjától, valamint a beton állapotától függ. Lényegében háromféle vizsgálati mód terjedt el, nevezetesen

- tiszta húzóvizsgálat,
- hajlítóvizsgálat,
- hasítóvizsgálat.

Tiszta húzóvizsgálatot csak elméleti célú kutatások során végeznek, mivel a centrikus erőátadást nagyon nehéz megvalósítani. A próbatesteket általában úgy alakítják ki, hogy azok a befogás környékén vastagabbak, mint a középső részén (3.13a ábra).

Hajlító-húzóvizsgálat (3.13b ábra) eredménye lényegesen függ a próbatest méreteitől, a terhelés módjától, valamint a próbatest állapotától.

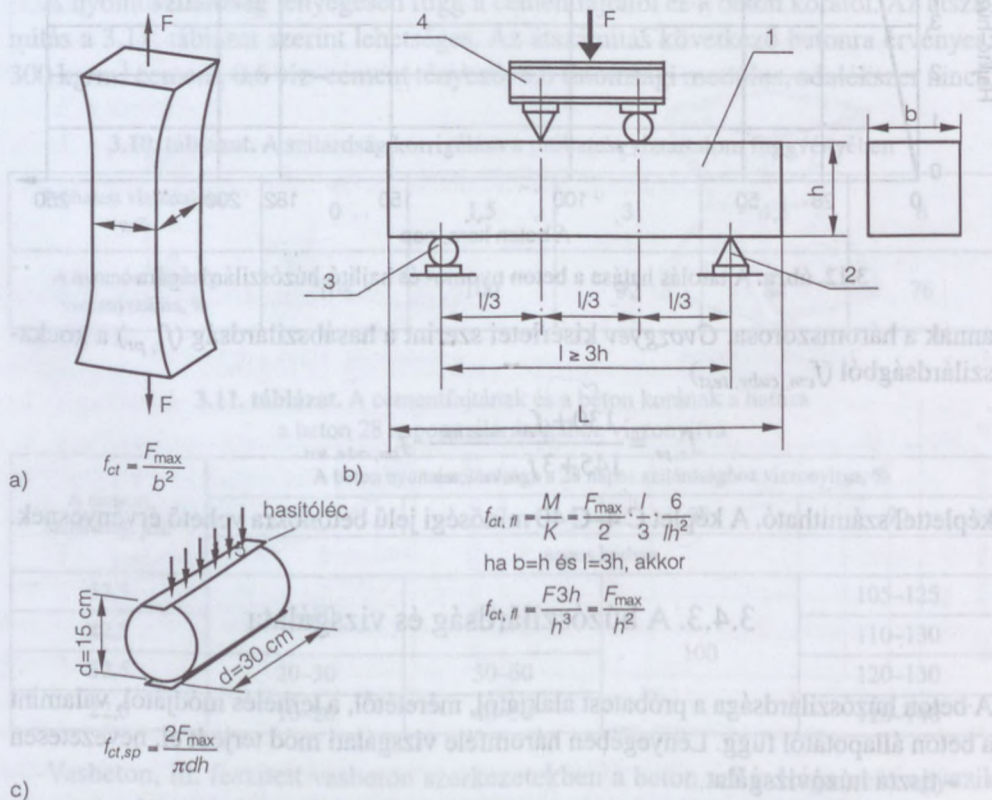
Az MSZ 4715-4 kétféle gerendaméretet ír elő, éspedig 150×150×700 mm-t, ill. útbetonepra 200×200×700 mm-t. A támaszköz 600 mm, a terhelés harmadpontos. Az egyik megtámasztás fix, a másik görgős. Átmérője 25–30 mm legyen.

Terheléskor a feszültség folyamatosan, $0,05 \pm 0,01 \text{ N (mm}^2 \cdot \text{s)}$ sebességgel növekedjék a próbatest tönkremenetelig. A vizsgálati eredményt csak akkor szabad figyelembe venni, ha a próbatest tönkremenetele a támaszköz középső harmadában következik be. A hajlító-húzószilárdság (f_{ct}) (ha $l=3h$ és $b=h$)

$$f_{ct,fl} = \frac{3F_{\max}}{h^2},$$

ahol F_{\max} a törőerő, N;

h a próbatest magassága, m.



3.13. ábra. Húzóvizsgálat. a) tiszta húzóvizsgálat; b) hajlító-húzóvizsgálat (1 – próbatest; 2 – fix támasz; 3 – görgős támasz; 4 – teherleosztó); c) hasító-húzóvizsgálat

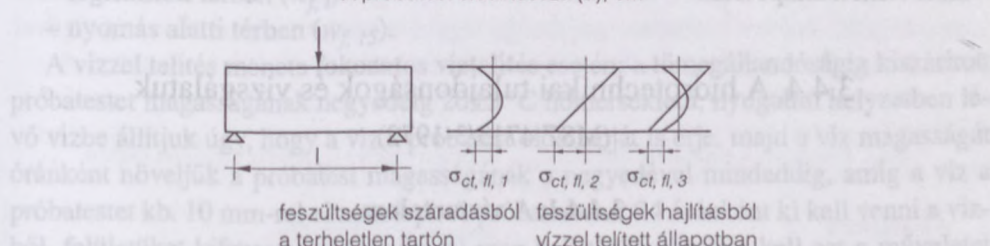
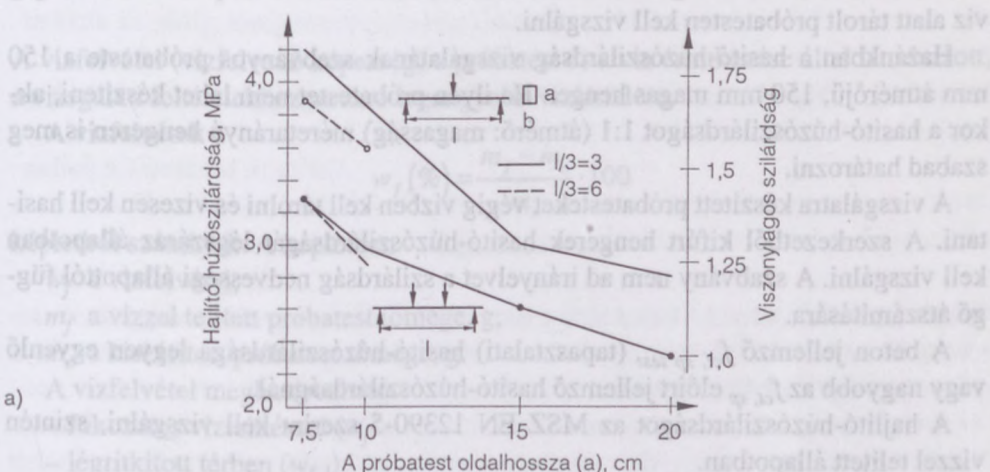
A hajlító-húzószilárdság a próbatest méreteitől és a terhelés módjától a 3.14a ábra szerint függ.

A hajlító-húzószilárdság lényegesen függ a beton korától. Így pl. fiatalkorú betonok esetén a hajlító-húzószilárdság és a nyomószilárdság viszonya, 1–2 napos korban kb. 1/8, ugyanakkor 28 napos és későbbi korban kb. 1/10.

Nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a hajlító-húzószilárdság lényegesen függ a próbatest nedvességi állapotától is (3.12 ábra). Legnagyobb abban az esetben, ha a próbatest vízzel teljesen telített, és legkisebb részben kiszáritott vagy száradó próbatest esetén. A hajlító-húzószilárdságot egyértelműen csak vízzel telített próbatesteken lehet összehasonlítani. A kiszáritott próbatest hajlító-húzószilárdsága a zsugorodási feszültségek miatt kisebb, mint a vízzel telítetté (3.14b ábra).

A hasító-húzószilárdságot betonhengerek vagy betonkockák élmenti terhelésével határozzuk meg (3.13c ábra). A hengerminta nagy előnye, hogy a megépített műtárgyból koronafúróval ki lehet venni, és így a műtárgy tényleges húzószilárdsága vizsgálható.

A kifúrt minta oldalfelülete nem tökéletesen szabályos, az eredmény függ a terheléradás módjától. Az MSZ 4715/4 szabvány szerint a próbatest és a terhelőerő kö-



b) $f_{ct, fl, 2}$: vízzel telített beton szilárdsága
 $f_{ct, fl, 3}$: száradó beton szilárdsága

3.14. ábra. A beton hajlító-húzószilárdságát befolyásoló tényezők

a) a méret és a terhelés módja, hatása; b) az egyenlőtlen kiszáradás okozta zsugorodás csökkenti a hajlító-húzószilárdságot

zé 4 ± 1 mm vastag, $d/10$ szélességű, a hengernél 5 mm-rel hosszabb acél hasítóléceket kell közbeiktatni, amely csökkenti az egyenlenségek hatását.

A hasító-húzószilárdság kocka vagy hasáb alakú próbatestek hasításakor az

$$f_{ct, sp} = 0,58 \frac{F_{max}}{A},$$

henger alakú próbatest esetén az

$$f_{ct, sp} = \frac{2F_{max}}{\pi d \cdot h}$$

képletből számítható, ahol

A a hasító sík területe, mm^2 ;

d a henger átmérője, mm;

h a henger hossza, mm.

Mivel a hasadási sík a próbatest középsíkján megy át, ezért a beton kiszáradása az eredményt alig befolyásolja.

Közelítően a hajlító-húzószilárdság kétszer akkora, mint a tiszta húzószilárdság és 1,5-szer akkora, mint a hasító-húzószilárdság.

A hasító-húzószilárdságot az MSZ EN 12390-6 szerint 28 napos korban, végig víz alatt tárolt próbatesten kell vizsgálni.

Hazánkban a hasító-húzószilárdság vizsgálatának szabványos próbateste a 150 mm átmérőjű, 150 mm magas henger. Ha ilyen próbatestet nem lehet készíteni, akkor a hasító-húzószilárdságot 1:1 (átmérő: magasság) méretarányú hengeren is meg szabad határozni.

A vizsgálatra készített próbatesteket végig vízben kell tárolni és vizesen kell hasítani. A szerkezetből kifűrt hengerek hasító-húzószilárdságát légszáraz állapotban kell vizsgálni. A szabvány nem ad irányelvet a szilárdság nedvességi állapottól függő átszámítására.

A beton jellemző $f_{ct, sp, test}$ (tapasztalati) hasító-húzószilárdsága legyen egyenlő vagy nagyobb az $f_{ct, sp}$ előírt jellemző hasító-húzószilárdságnál.

A hajlító-húzószilárdságot az MSZ EN 12390-5 szerint kell vizsgálni, szintén vízzel telített állapotban.

3.4.4. A hidrotechnikai tulajdonságok és vizsgálatuk

(MSZ 4713/3-1972)

3.4.4.1. A víztartalom

A beton víztartalma az a vízmennyiség, amely a betonból $105-110$ °C hőmérsékleten – tömegállandóságig való szárítással – eltávolítható.

A próbatest lehet szabályos vagy szabálytalan, de a vizsgálat során nem szabad anyagvesztésnek bekövetkeznie. A próbatest legyen zömök. Ha $d_{max} \leq 32$ mm-es

az adalékanyaga, akkor köbtartalma legalább 4000 cm^3 , ha $d_{\text{max}} > 32$, akkor legalább 8000 cm^3 legyen.

A vizsgálat menete. A próbatestről minden idegen anyagot el kell távolítani, sablonban készített próbatest felületét drótkefével fel kell érdesíteni.

A próbatestet ismert tömegű tálcára kell helyezni és $105\text{--}110 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékletű szárítószekrényben tömegállandóságig ki kell szárítani. Tömegállandónak tekintjük, ha a 24 óránkénti mérés során a változás nem több 10 g -nál.

A víztartalmat a

$$w\% = \frac{m_n - m_o}{m_o} \cdot 100$$

képlettel számítjuk, ahol

$w\%$ a víztartalom a kiszáritott beton tömegszázalékában kifejezve;

m_n a próbatest tömege a szárítószekrénybe helyezés előtt, g;

m_o a kiszáritott próbatest tömege, g.

3.4.4.2. A vízfelvétel

A vízfelvétel (vízfelvevő képesség) a próbatest és a víz érintkezése által létrehozott, a vizsgálati feltételekhez tartozó legnagyobb víztartalom.

A vízfelvétele a

$$w_f(\%) = \frac{m_f - m_o}{m_o} \cdot 100$$

képletből számítjuk. A képletben

w_f a vízfelvétel;

m_f a vízzel telített próbatest tömege, g;

m_o a kiszáritott próbatest tömege, g.

A vízfelvétel meghatározható

– fokozatos víztelítéssel ($w_{f,1}$)

– légritkított térben ($w_{f,l}$)

– nyomás alatti térben ($w_{f,15}$).

A vízzel telítés menete **fokozatos víztelítés** esetén: a tömegállandóságig kiszáritott próbatestet magasságának negyedéig $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékletű, nyugalmi helyzetben lévő vízbe állítjuk úgy, hogy a víz a próbatest oldallapját is érje, majd a víz magasságát óránként növeljük a próbatest magasságának a negyedével mindaddig, amíg a víz a próbatestet kb. 10 mm -rel el nem lepi. A próbatesteket 24 óránként ki kell venni a vízből, felületüket kifacsart vászonruhával meg kell törölni. Addig kell ezt a műveletet folytatni, amíg a tömegállandóság be nem következik.

Ha a beton összetétele főzés hatására nem változik, akkor a vízfelvétel úgy is meghatározható, hogy a próbatestet főzőedényben vízzel elborítjuk, a vizet 3 órán át forraljuk, majd kihűlés után a vízből kivesszük és a tömegét megmérjük.

A fokozatos víztelítéssel meghatározott vízfelvételt *látszólagos porozitásnak* is nevezzük. Valamivel rendszerint kisebb, mint a tényleges porozitás. Ugyanis a kapilláris pórusok a vizsgálat során megtelnek vízzel, de a légpórusok rendszerint nem.

Légritkított térben a vízfelvételt úgy érjük el, hogy a légszáras próbatestet forralt vízzel telt edénybe tesszük és edényestől 3 órán át 2000–2670 Pa nyomású légritkított térben tároljuk. Ezt követően további 21 órán át forralt vízzel telt edényben, légköri nyomáson tartjuk, majd a vízből kivéve felületét kifacsart nedves ruhával letöröljük, és így határozzuk meg a tömegét (m_f). Végül tömegállandóságig kiszáritjuk és újra megmérjük a tömegét.

A **nyomás alatti vízfelvétel** abban különbözik a légritkított térben meghatározottól, hogy a 3 órás légritkított térben tárolás után – fokozatosan növelve – 15 MPa légnomást hozunk létre, azt 21 órán át fenntartjuk. Azután fokozatosan megszüntetjük a légnomást, a próbatestet a vízből kiveszünk, kifacsart vászonruhával letöröljük és úgy mérjük meg a tömegét. Ezt tekintjük vízzel telített próbatestnek.

A nyomás alatti vízfelvételeből lehet következtetni a fagyállóságra. Ugyanis a *telítési tényező* a fokozatos vízbemerítéssel (w_f) és a nyomás alatti telítéssel ($w_{f,15}$) meghatározott vízfelvétel hányadosa:

$$tt = \frac{w_f}{w_{f,15}}$$

ha $tt < 0,85$, akkor a beton valószínűen fagyálló, mivel a megfagyó víznek van helye a kitágulásra.

3.4.4.3. A vízzáróság és vizsgálata

Vízzáró, ill. vízáteresztő a beton akkor, ha a meghatározott egyoldali víznyomás esetén az ellentétes oldalon vagy egyáltalán nem jelenik meg a víz (a megjelent víz el is párolog), vagy csak bizonyos mértékben jelenik meg.

A vízzárósági vizsgálat elvégezhető a betonkeverékből készített, a 3.12. táblázatban feltüntetett próbatesten. Ha a szerkezet vastagsága kisebb a táblázatban megadott magasságnál, akkor a próbatest magassága legyen azonos a szerkezet vastagságával. A szerkezetből vett próbatestek mérete ettől eltérhet.

3.12. táblázat. A próbatest méretei d_{\max} függvényében vízzáróságvizsgálat esetén (MSZ 4715-3:1972)

A betonadalék legnagyobb szemmagassága, d_{\max}	A próbatest méretei mm-ben			
	hasáb		henger	
	alaplapja	magassága	átmérője	magassága
$d_{\max} \leq 32$	200 × 200	120	150	120
$32 < d_{\max} \leq 63$	300 × 300	150	250	150

A betonkeverékből készített próbatesteket úgy kell készíteni, hogy a bedolgozás és a víznyomás iránya legyen azonos a megépített szerkezetével.

A próbatesteket elkészítésük után 24 órával kiszaluzzuk, 7 napos korig 20 ± 3 °C hőmérsékletű vízben, azt követően 20 ± 3 °C hőmérsékletű szobalevegőn kell tárolni. A víznyomásra merőleges felületet kiszaluzás után drótkéfével fel kell érdesíteni.

Olyan készülékre van szükség, amellyel a próbatest vízzel érintkező felületén a megfelelő víznyomást létre lehet hozni, a vízfogyasztást 1% pontossággal mérni lehet, és a próbatesten átszivárgó víz 1 g hibahatárral megmérhető.

A próbatestet két szorítófej közé úgy kell elhelyezni, hogy a felső fejben kiképzett nyomókamra és az alsó fejben kiképzett kifolyónyílás rugalmas tömítőgyűrűvel vízzáróan csatlakozzék a próbatest vizsgálandó felületéhez. A felső és az alsó kör alakú vizsgálati felület azonos méretű legyen. A vizsgálandó felület átmérőjét a 3.13. táblázat szemlélteti. A vizsgálóberendezés csövei, tartályai és szelepei tökéletesen zárjanak, vízveszteség csak a próbatesten át következzen be. A nyomókamrárt légteleníteni kell, hogy a víz buborékmentes legyen.

A vizsgálat menete az MSZ 4715-3 szerint. A próbatesteket 48 órán át 1 daN/cm^2 , ezt követően – 24 óránként növelve a nyomást – 2, 4, 8, 16 daN/cm^2 túlnyomásnak tesszük ki addig, amíg a víznyomással ellentétes oldalon nedves folt meg nem jelenik. A nedves folt megjelenése után a próbatest vízzáró burkához vízzáróan rögzített gyűjtőedényben az átfolyt vizet 2, 6, 12, 18 és 24 óra múlva a vízmérőkön leolvassuk.

A vizsgálat után azonnal (lehetőleg középen) elhasítjuk a próbatestet, és felrajzoljuk a vizesedés mértékét.

Ha az előírt legnagyobb fokozatnál sem következett be vízátzivárgás, akkor ezt a fokozatot még 24 órán át működtetjük, majd a próbatestet – előzőek szerint – elhasítjuk és megvizsgáljuk.

A vizsgálat során meg kell állapítani azt a legnagyobb nyomásfokozatot, amelyenél a próbatest felületén még nem észleltünk nedves foltot, valamint, ha folt keletkezett, akkor az észlelés időpontját, és az ehhez tartozó víznyomást. Továbbá meg kell mérni a folt keletkezése után a nyomásfokozás időpontjában a vízfogyasztást és a mérőedényben összegyűlt vízmennyiséget, az elhasított felület struktúráját és a nedves felület alakját. Ha víz nem szivárgott át, akkor csak a nedvesített felületet.

A beton vízzáróságát újabban – az MSZ 4798-1:2004 szabvány előírásainak megfelelően – az MSZ EN 12390-8:2001 szabvány szerint kell vizsgálni, legalább 28 napos korú, végig víz alatt tárolt próbatesten, 75 mm átmérőjű körfelületen, 72 ± 2 órán át ható, 5 bar ($0,5\pm 0,05 \text{ MPa}$) állandó víznyomással. A próbatest víznyomásra merő-

3.13. táblázat. A víznyomásnak kitett felület átmérője (MSZ 4715-3:1972)

A próbatest		A felső és alsó vizsgált felület átmérője (a tömítőanyag által körülhatárolt méret), mm
hasáb alapéle, mm	henger átmérője, mm	
200	150	$100\pm 0,5$
300	250	$200\pm 1,0$

leges, felérdesített oldalának a hossza vagy átmérője legalább 150 mm, magassága legalább 100 mm legyen. Eszerint a vizsgálatot a hazánkban szokásos 200×200×120 mm méretű hasábon, vagy a 150 mm oldalhosszú szabványos kockán is el lehet végezni.

Ha a vizsgálatot 200×200×120 mm méretű hasábon végezzük, akkor 100 mm átmérőjű körfelületen is szabad az 5 bar víznyomást hattaní, de ebben az esetben a vizsgálati jegyzőkönyvben a próbatest méretét és a víznyomásnak kitett körfelület átmérőjét is meg kell adni.

Hazánkban szabad a vízzáróságot vegyesen (7 napos korig víz alatt, utána laboratóriumi levegőn) tárolni, ha ebben a tervező (előíró) és a gyártó előzetesen megállapodik, de ebben az esetben a vegyes tárolást a jegyzőkönyvben is fel kell tüntetni.

A beton vízzárósága – a tárolás módjától függetlenül – akkor megfelelő, ha a vizsgálat eredményeként minden próbatesten a vízbehatolás mélysége

- XV1(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 60 mm;
- XV2(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 40 mm;
- XV3(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 20 mm;

A végig vízben tárolt próbatesteken – a jobb hidratáció miatt – és a zsugorodás kizárása miatt kisebb vízbehatolás várható, mint vegyes tárolás esetén.

A régi és az új vízzáróság-vizsgálatot a 3.15. ábrán hasonlították össze.

3.4.4.4. A vízáteresztés és vizsgálata

A vízáteresztés a betonnak az a tulajdonsága, hogy a víznyomás hatására a víz a kapilláris pórusokon áthatol.

A beton vízáteresztése a vízáteresztési együtthatóval (k) jellemezhető és a Darcy-törvény alapján határozható meg. A Darcy-törvény feltételezi, hogy a víz folytonos, összenyomhatatlan, a vizsgálandó anyag merev és homogén, a víz áramlása lamináris és az áramlási sebesség állandó. A Darcy-törvényt talajok vízáteresztésének a jellemzésére használják. A betonra is használható, de még nincsenek követelményértékek.

A próbatesten áteresztett vízmennyiség a

$$Q = k \frac{h}{d} A \cdot t$$

képlettől számítható, ahol

Q az áteresztett vízmennyiség, m^3 ;

A a próbatest keresztmetszeti területe, m^2 ;

t a szivárgás időtartama, s;

h a nyomást előidéző vízoszlop magassága, m;

d a szivárgási hossz (a próbatest vastagsága), m;

$i = \frac{h}{d}$ a hidraulikus gradiens;

k az átérésztési együttható, m/s.

A képletből a vízátérésztési együttható

$$k = \frac{Q}{i \cdot A \cdot t},$$

tehát az a vízmennyiség, amely egységnyi hidraulikus gradiens esetén, egységnyi felületen, egységnyi idő alatt átfolyik.

A vízátérésztési együttható meghatározását egy példán mutatjuk be (3.16. ábra). A próbatestet 15 cm átmérőjű magfúróval a síófoki hajózsilip alaplemezből vettük. A vizsgálandó próbatestet ebből a magmintából 8 cm vastagra fűrészeltük. A próbatestet acélsablonba tettük és közben úgy leszigeteltük, hogy víz csak a próbatesten hatolhasson át. A számítás menetét a 3.16. ábrán szemléltettük.

3.4.4.5. A fagyállóság és vizsgálata

(MSZ 4715/3-1972)

Fagyállónak nevezzük a betont, ha várható élettartama során – a fagyasztás és olvasztás együttes hatására – tulajdonságai lényegesen nem változnak.

A fagyállóság vizsgálata elvégezhető ciklikusan ismétlődő gyorsfagyasztással, vagy gyorsfagyasztással levegőn és vízben való olvasztással. Egy fagyasztási ciklus mindkét esetben legalább 2 órás állandó hőmérsékleten tárolást jelent $+20 \pm 3$ °C hőmérsékletű vízben, majd legalább 4 órás tárolást -20 ± 3 °C hőmérsékletű fagyasztótérben. A próbatest hőmérséklete első esetben 1 órán belül, fagyasztótérben 2 órán belül érje el a tér hőmérsékletét.

A beton két ok miatt mehet tönkre. Egyik ok a víz térfogatnövekedése fagy hatására, a másik ok a hirtelen hőmérséklet-változás okozta húzófeszültségek keletkezése. Emiatt a legfeljebb 32 mm legnagyobb szemmagyságú adalékanyaggal készített beton térfogata legalább $5-8 \text{ dm}^3$, a 32–63 mm szemmagyságú adalékanyaggal készítetté $20-30 \text{ dm}^3$ legyen. Ennek az előírásnak megfelelnek a szilárdsági vizsgálatra készített próbatestek.

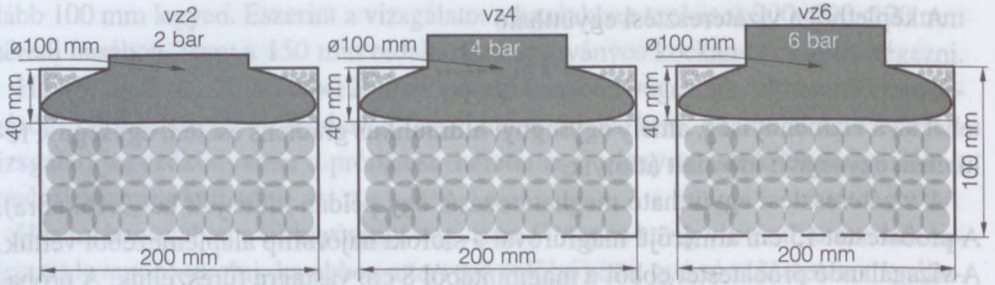
Adott fagyasztási ciklusra a fagyállóság megítélhető a tömegveszteség alapján, roncsolásos szilárdsági vizsgálattal, ill. roncsolásmentes vizsgálattal.

Adott ciklusra fagyállónak minősítendő a beton:

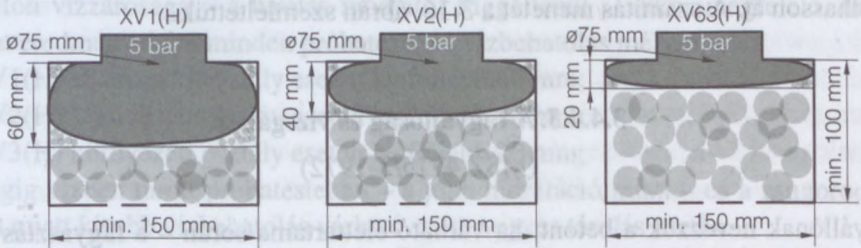
- a próbatest tömegvesztesége 5%-nál kisebb,
- a beton szilárdsága az azonos korú, anyagú, vízzel telített, nem fagyasztott betonéhoz képest legfeljebb 25%-kal csökken,
- a roncsolásmentes vizsgálat jelentős minőségváltozásra utal.

A tömegveszteség meghatározása során, ha a fagyasztást levegőn való gyorsfagyasztással és vízben való olvasztással végezzük, nagyon vigyázni kell az indokolatlan tömegveszteség megakadályozására. Pl. próbatestenként rácsos fa kalodát készítünk, abba helyezzük a próbatestet és a kalodát tesszük egyik térből a másikba.

Vízzáróság vizsgálat az MSZ 4715-3:1972 szabvány szerint



Vízzáróság vizsgálat az MSZ EN 12390-8:2001 szabvány, illetve az MSZ EN 206-1:2002 NAD (2003) szabvány szerint



3.15. ábra. A vízzáróságvizsgálat összehasonlítása a régi és az új szabvány szerint

$$Q = 690 - 260 = 430 \text{ cm}^3$$

$$A = \frac{15^2 \pi}{4} = 172 \text{ cm}^2$$

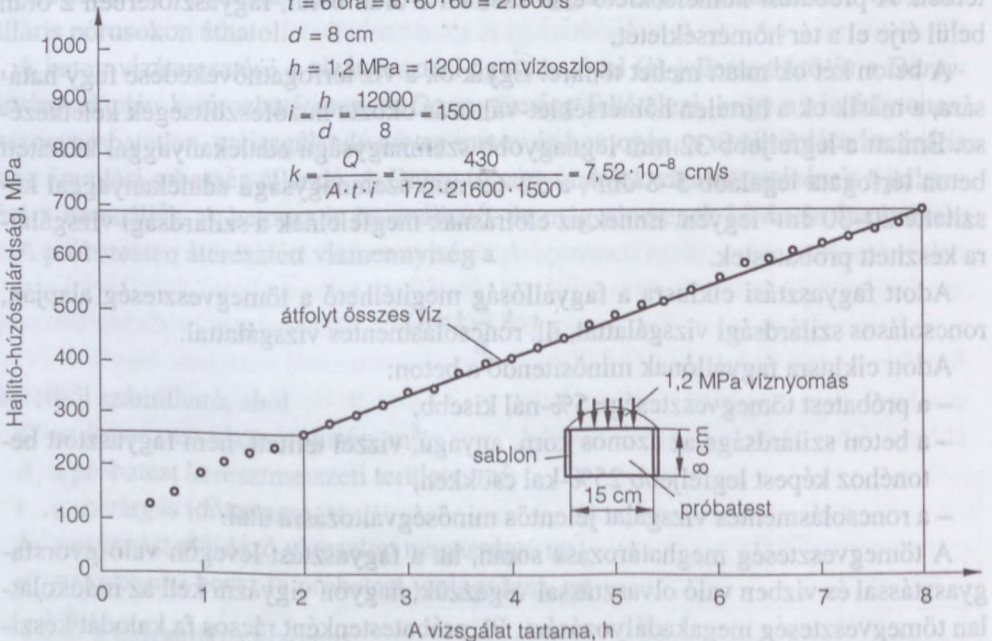
$$t = 6 \text{ óra} = 6 \cdot 60 \cdot 60 = 21600 \text{ s}$$

$$d = 8 \text{ cm}$$

$$h = 1,2 \text{ MPa} = 12000 \text{ cm vízoszlop}$$

$$i = \frac{h}{d} = \frac{12000}{8} = 1500$$

$$k = \frac{Q}{A \cdot t \cdot i} = \frac{430}{172 \cdot 21600 \cdot 1500} = 7,52 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}$$



3.16. ábra. A vízáteresztési tényező meghatározása

A fagyasztott beton szilárdságának az eredeti, vízzel telített, nem fagyasztott beton szilárdságához való viszonyát,

$$f = \frac{f_{ci,f}}{f_{ci}}$$

fagyulási tényezőnek is nevezzük. A képletben

f a fagyulási tényező;

$f_{ci,f}$ a fagyasztott próbatest nyomószilárdsága, N/mm²;

f_{ci} a nem fagyasztott, azonos korú, vízzel telített próbatest nyomószilárdsága, N/mm².

A roncsolásmentes vizsgálat ciklikus vizsgálat, amely során az ultrahang terjedési sebességének a változásából (betonoszkópos vizsgálat) a betonban bekövetkező struktúraváltozásra lehet következtetni. Előnye, hogy a mérés tetszés szerint ismételtelhető anélkül, hogy a próbatest tönkremenne.

Vizsgálat nélkül is általában fagyállónak tekinthető, ha a beton vízfelvétele fokozatos vízbemerítéssel 0,5 m%-nál kisebb, ill. a telítési tényezője legfeljebb 0,8. Ezeket azonban csak gyors becslésre használjuk, döntő (bár igen hosszú) a fagyasztási vizsgálat.

A fagyállósági követelményt a tervező írja elő (15, 25, 50, 100, 150).

Az MSZ 4715/3-1972 szabvány szerint a mérést megelőző fagyasztási ciklusszám a 3.14 táblázat szerinti. Valamennyi mérést a 20±3 °C-os hőmérsékletű vízből kivett, nedves vászonkendővel letörölt próbatesteken kell elvégezni.

Az MSZ 4798-1:2004 szabvány szerint, ameddig nincs érvényes európai szabvány, addig hazánkban a beton fagyállóságát, ha a beton olvasztósó hatásának nincs kitéve (azaz környezeti osztálya XF1 és XF3), legalább 28 napos, legfeljebb 35 napos korú, vízzel telített próbatesteken kell vizsgálni.

A vizsgálatához 150 mm oldalhosszú próbakockát vagy Ø150/150 mm (vagy Ø100/100 mm) méretű hengert kell használni. A vizsgálatához a fagyasztott próbatestekkel azonosan készített, azonos korú, és méretű, végig vízben tárolt, de nem fagyasztott referencia-próbatestekre is szükség van. Számuk legalább 3 legyen. Ezenkívül további egy próbatest geometriai középpontjában mérni kell a hőmérsékletet.

3.14. táblázat. A mérést megelőző fagyasztási ciklusszám az előírt fagyasztási szám függvényében (MSZ 4715-3:1972)

Az előírt fagyasztási szám	A mérést megelőző fagyasztási ciklusszám						
	tömegvesztés mérésénél és felületvizsgálatnál			roncsolásmentes vizsgálatnál			roncsolásos szilárdság-vizsgálatnál
15	7,	10,	15	10,	15		15
25	15,	20,	25	20	25		25
50	25,	35,	50	25,	35,	50	50
100	50,	75,	100	50,	75,	100	100
150	75,	100,	150	75,	100,	150	150

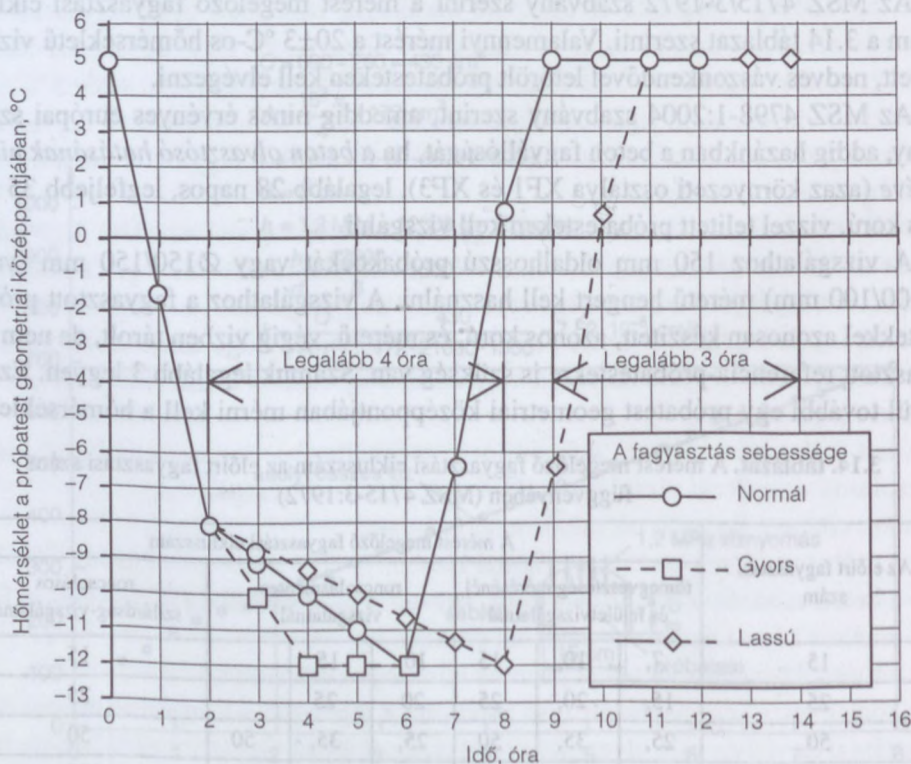
Az MSZ 4798-1:2004 szabvány – az XF1 és XF3 környezeti osztályú betonok – fagyállóság-vizsgálata egy ciklusra a 3.17. ábrát írja elő.

Az XF1 környezeti osztályban legalább 50, az XF3 környezeti osztályban legalább 100 ciklusra való fagyállóságot követelnek meg. Adott környezeti osztályra akkor fagyálló a beton, ha tömegvesztesége legfeljebb 5 m%, ill. a fagyasztott próbatetek nyomószilárdság csökkenése a referencia-próbatestekéhez képest legfeljebb 20%.

Ha a beton fagnak és olvasztósó hatásának egyidejűen ki van téve (XF2 és XF4 környezeti osztály), akkor hazánkban a szilárd beton fagy- és sózás-állóságát ugyancsak legalább 28 napos, legfeljebb 35 napos korú és vízzel telített, de egyik felületén peremmel körülhatárolt és a peremen belül 3%-os, 3 mm mély nátrium-klorid-oldattal feltöltött próbatesteken kell vizsgálni. (A módszer részletes leírása a prEN 12390-9:2002 szabványtervezetben található, amihez nagyon hasonlít az MSZ EN 1338:2003 szabvány D melléklete is. Az MSZ 4798-1:2004 szabvány ezeket ajánlja addig, amíg az idevágó európai szabvány érvénybe lép.)

A próbatetek vizsgált felülete legalább 7500 mm² és legfeljebb 25000 mm², vastagsága legalább 50 mm, legfeljebb 103 mm legyen.

A (20±2) °C hőmérsékletű próbatetek öt oldalára (a vizsgált felület kivételével) gumiréteget kell ragasztani úgy, hogy az a vizsgált felület körül (20±2) mm magas



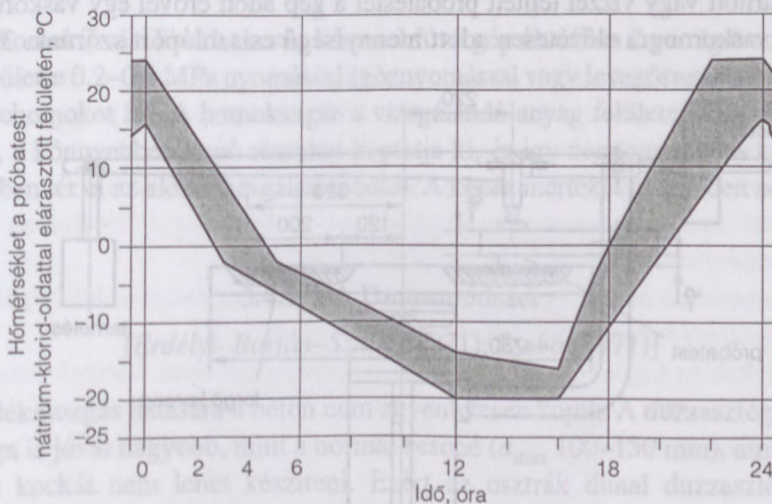
3.17. ábra. A fagyállóság-vizsgálat fagyasztási-olvasztási diagramja az XF1 és XF3 környezeti osztály esetén

peremet képezzen, ahol tömíteni is kell. A (20 ± 2) °C hőmérsékletű klímasekrénybe helyezett próbatetek pereme közé (5 ± 2) mm magasan (20 ± 2) °C hőmérsékletű vizet kell önteni, és azt (72 ± 2) órán át állni kell hagyni. A próbateteket a vizsgált felület kivételével hőszigetelő réteggel kell körülvenni. A légkeveréses fagyasztószelekre való helyezés előtt 15–30 perccel a peremek közötti vizet 3%-os nátrium-klorid-oldattal kell kicserélni, és a próbateteket a peremeken túlnyúló, azokra ráhajlított polietilénfóliával le kell takarni, a párolgás megakadályozása végett. A fagyasztás-olvasztás vizsgálata alatt mérni és folyamatosan rajzolni kell a levegő hőmérsékletét a fagyasztószelekreben úgy, hogy egy, a fagyasztószelekreben jellemző helyen lévő próbatest 3%-os nátrium-klorid-oldattal elárasztott felületének közepére termoelemet (vagy hasonló mérőeszközt) helyezünk, amelyet rajzolóberendezéshez kell csatlakoztatni. Az XF2 és XF4 környezeti osztályú beton fagy- és olvasztósó-állósági vizsgálatának fagyasztási-olvasztási diagramját a 3.18. ábra tartalmazza.

A nátrium-klorid-oldatot az addig lemállott részekkel együtt 7 vagy 14 ciklusonként edénybe kell tölteni. A fagyasztás folytatása előtt a peremet (5 ± 2) mm magasan friss nátrium-klorid-oldattal fel kell tölteni. Az oldatsere gyakorisága az oldat párolgásának legyen a függvénye, ügyelve arra, hogy a vizsgálat alatt az oldat magassága mindig legalább 3 mm legyen.

A próbatestről leöntött oldatot le kell szűrni, a szűrőpapíron fennmaradt mállott részeket össze kell gyűjteni, legalább 1 liter vízzel meg kell mosni, majd (60 ± 5) °C hőmérsékleten legalább 24 órán át, tömegállandóságig kell szárítani, és a tömegét meg kell mérni. Ezt a műveletet minden oldatsere során el kell végezni, és a tömegvesztésüket oldatsereként és együtt is meg kell adni.

A vizsgálat 56 fagyasztási-olvasztási ciklusig tart. A vizsgálat eredménye a kiszáritott mállott részek grammban mért tömegének és a m^2 -ben kifejezett vizsgálati felü-



3.18. ábra. A fagy- és olvasztósó-állósági vizsgálat fagyasztási-olvasztási diagramja az XF2 és XF4 környezeti osztály esetén

letnek a hányadosa. Az 56 ciklus végén az XF2 környezeti osztályú beton esetén a mállott részek kiszáritott állapotában meghatározott összes tömegveszteség átlaga legfeljebb 500 g/m², legnagyobb egyedi értéke legfeljebb 700 g/m², az XF4 környezeti osztályú beton esetén ugyancsak kiszáritott állapotban az összes tömegveszteség átlaga legfeljebb 250 g/m², legnagyobb egyedi értéke legfeljebb 350 g/m² legyen.

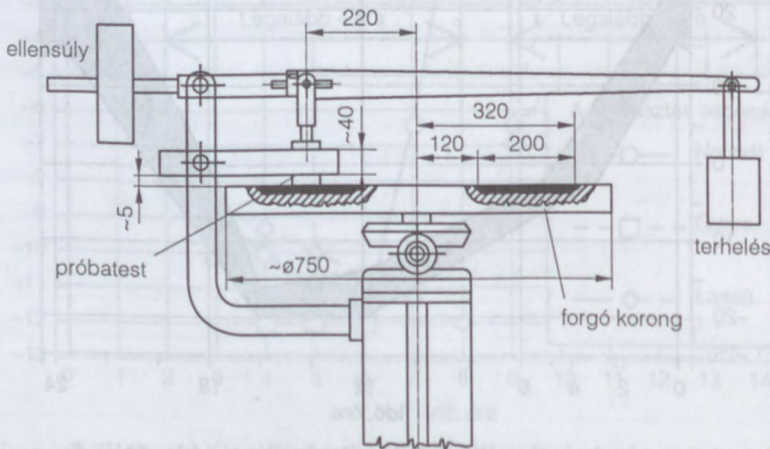
Ha a szilárd beton olvasztósó hatásának ki van téve, és az előíró és a gyártó meg-
egyeznek a fagy- és olvasztósó-állósági vizsgálat elhagyásában, akkor a beton meg-
felelősége igazolható az MSZ EN 480-11:2000 szabvány szerint meghatározott tá-
volsági tényezővel, amely $\leq 0,22$ mm legyen.

3.4.5. A kopásállóság és vizsgálata

A *kopásállóság* az anyagnak az a tulajdonsága, hogy meghatározott intenzitású me-
chanikus koptatás hatására térfogata nem csökken jelentősen. A beépített építőanya-
gok koptató hatásnak kétféleképpen lehetnek kitéve. Nevezetesen megkülönböztethe-
tő egyenletes kopás (lépcsők, padozatok, járdák) és nem egyenletes kopás bunkerek,
silók kopása a tárolt szemcsés anyag hatására, falak kopása a szél által hordott homok
hatására, vízepítési beton kopása a hordalék hatására).

3.4.5.1. Böhme-koptatás

A Böhme-koptatógép az egyenletes koptatást modellezi (3.19. ábra). A vizsgálat során
a koptatógépbe helyezett 50 cm² alapterületű, 7,07 cm élhosszúságú, rendszerint kocka
alakú, kiszáritott vagy vízzel telített próbatestet a gép adott erővel egy vaskoronghoz
szorítja. A vaskorongra előzetesen adott mennyiségű csiszolóport szórunk. 352 for-



3.19. ábra A kopásállóság vizsgálata: Böhme-koptatógép vázlat

3.15. táblázat. A kopásállóság megnevezése a Böhme-koptatás alapján (MSZ 4798-1:2004)

A kopásállóság		
környezeti osztály	megnevezése	jele
XK1(H)	Mérsékeltlen kopásálló	K14/28
XK2(H)	Kopásálló	K12/18
XK3(H)	Fokozottan kopásálló	K10/16
XK4(H)	Igen kopásálló	K8/14

3.16. táblázat. Követelmény a beton kopásállóságára (MSZ 4798-1:2004)

A ΔV kopási térfogatvesztés megengedett mértéke mm ³ -ben		
Környezeti (igénybevételi) osztály	Száraz koptatás esetén	Vizes koptatás esetén
XK1(H)	14 000	21 000
XK2(H)	12 000	18 000
XK3(H)	10 000	16 000
XK4(H)	8 000	14 000

dulat után előálló térfogatsökkenést (mm³) tekintjük a kopás mértékének. A térfogatsökkenés alapján jelöljük a kopásállóságot.

A koptatás lehet száraz vagy vizes. Vizes koptatás esetén koptatás közben is vizet kell csöpögtetni. Vizes koptatással mindig lényegesen nagyobb a magasságsökkenés, mint a száraz koptatással.

A kopásállóság megnevezését a 3.15., a követelményt a 3.16. táblázat szemlélteti.

3.4.5.2. A Gary-homokfúvási koptatás

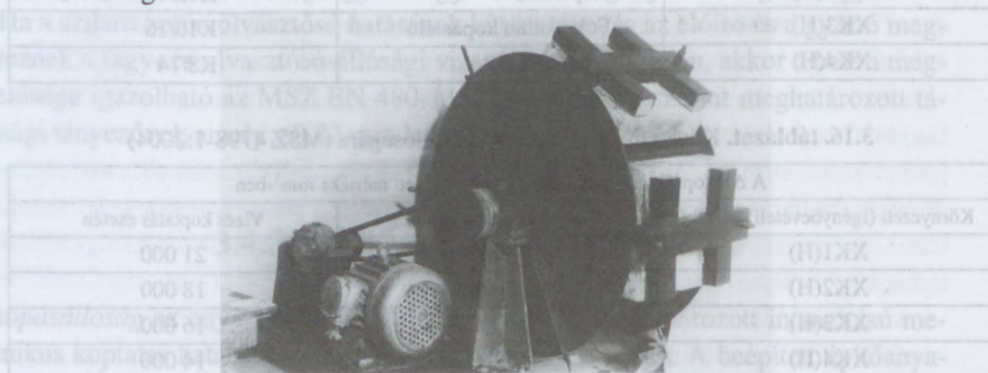
A Gary-homokfúvási kísérlet során a homokfúvó gép általában 2 percig 6 cm átmérőjű körfelületre 0,2–0,3 MPa nyomással (gőznyomással vagy levegősugárral) finomszemű kvarchomokot fúj. A homoksugár a vizsgálandó anyag felületéről előbb a finom részeket, a könnyebben kopó részeket koptatja ki, és így nem egyenletes kopást hoz létre. Ebben tér el az előző vizsgálati módtól. A kopás mértékét g/cm²-ben adjuk meg.

3.4.5.3. A Duna-módszer

[Erdélyi–Borján–Szabó (1971), Szabó (1971)]

A hordalékmozgás hatására a beton nem egyenletesen kopik. A duzzasztógátak adalékanyaga is jóval nagyobb, mint a normál betoné (d_{\max} 100–150 mm), amiből 7 cm élhosszú kockát nem lehet készíteni. Ezért az osztrák dunai duzzasztóműveket készítőik kidolgozták a Duna-módszert, amely jól utánozza a víz és a vízzel mozgó hordalék ütő-koptató hatását.

A koptatóberendezés (3.20. ábra) egy forgódob, amelynek a palástján 6 db, 40x40 cm² alapterületű próbatestet helyezünk el, vízzáró kapcsolattal. A koptatott felület kb. 32x32 cm². A dobba az utolsó próbatest felerősítése után 10 liter vizet töltünk. A koptatást szintén a dobba helyezett 10 kg tömegű, megadott összetételű dunakavics végzi.



3.20. ábra. A Duna-módszer koptatóberendezése

A dob percenkénti fordulatszáma 60. A próbatesteket 36 órán át koptatjuk. A dob 18 órán át az egyik, majd 18 órán át a másik irányban forog. (Az Építőanyagok Tanszéken a Los-Angeles dobot alakítottuk át a Duna-módszer szerinti koptatóberendezésnek).

A kopásállóság fordítottan arányos a kikopott anyag mennyiségével, amit tömegváltás-, ill. térfogatmérés alapján határozhatunk meg.

A tömegváltás mérésének menete:

- Koptatás előtt a próbatestet tömegállandóságig kiszárítjuk.
- Megmérjük tömegét és méreteit. Kiszámítjuk a testsűrűséget.
- Elvégezzük a koptatást.
- A próbatesteket lemoszuk és újra kiszárítjuk tömegállandóságig.
- A próbatest eredeti és lekoptatott tömege különbsége a kopási veszteség.
- A testsűrűség ismeretében kiszámítjuk az átlagos kopási mélységet.

A módszer hibái:

- A közel 40 kg tömegű próbatestet nehéz mozgatni, kiszárítani.
- A szükséges nagy pontosságú mérést csak a Mérésügyi Hivatalban tudnánk megvalósítani.
- Az ismertetett nehézségek megnövelik a vizsgálat tartamát és költségeit.

A térfogatcsökkenés mérése közvetlen módszerrel:

Folyadékok (a higany kivételével, amelyik mérgező) nem felelnek meg, mert a kapillaris pórusokba behatolnak, és így – látszólag – növelik a porozitás mértékét.

Porszerű anyagok használata során a halmazsűrűség bizonytalansága okoz nehézséget.

Szabó János (1971) III. éves mérnökhallgató a térfogatmérésnek gyors és megbízható módszerét dolgozta ki.

A kikoptatott térfogatot plasztilinnel töltötte ki a koptatás és lemosás után a következőképpen:

- Előkészítjük a plasztilint, amely finom kőrlemény és olaj adott sűrűségű keveréke. Az előkészítés abból áll, hogy melegítéssel megfelelően képlékennyé tesszük. Eközben többször átgyúrjuk. Szabó János a képlékenységet akkor tartotta megfelelőnek, ha a cement kötési idejének a meghatározására szolgáló Vicat-készülékhez tartozó kaucsuk gyűrűbe bedolgozott plasztilinbe – a pótsúly nélküli tű – 40 mm-re hatol be. Kis gyakorlat után vizsgálat nélkül is meghatározzuk a megfelelő képlékenységet.
- A plasztilinból gyurmagolyókat készítünk, azokat tenyerünkkel a kikoptatott felületen kissé szétnyomjuk. A szétnyomkodott golyócskákat egymással is összedolgozzuk. A kikoptott térfogatba a plasztilint túltöltjük, a széleken a felesleges plasztilint spatulyával lehúzzuk.
- A túltöltött plasztilint – acélvonalzó segítségével, hántoló mozgatással – lehúzzuk (3.21. ábra). Addig végezzük a lehúzást, amíg a vonalzó a nem koptatott, sima betonszélien egyenletesen felfekszik. Utána a próbatestet 90°-kal elforgatjuk, és a hántoló elhúzást újra megismételjük. A felesleges plasztilin hántoló mozgatása különösen ott szükséges, ahol kicsi a kopásmélység.
- A plasztilin bedolgozása kb. 35–40 percet vesz igénybe. Utána a próbatestet 1–2 órára hűvös helyre tesszük. Ezt követi a bedolgozott plasztilin lefejtése. Rendszerint egyik saroknál kezdjük, ahol a legvastagabb a réteg. Majd a spatulyával kissé megfeszítjük, míg egyik kezünkkel tartjuk a lefejtett réteget (3.22. ábra). Óvatos lefejtéssel a plasztilinréteget egyben kiemelhetjük (3.23. ábra).
- A plasztilin térfogatát úgy határozta meg, hogy a leválasztott, törmeléktől megtisztított plasztilinréteget 4×4×16 cm méretű hasábsablonba dolgozta be ugyanúgy, mint a koptatott felületbe. Megfelelő bedolgozási technológiával elérhető, hogy a hasábok pórusmentesek legyenek.
- A plasztilinréteg tömege és sablonban meghatározott térfogata ismeretében számíthatjuk a plasztilin testsűrűségét, majd a kikoptott réteg átlagos vastagságát. Ha plasztilinréteget – a sablonba való bedolgozás előtt – mindkét irányban szeleteljük, akkor a rétegvastagság finomítható.



3.21. ábra. A plasztilin lehúzása vasvonalzóval



3.22. ábra. A plasztílinréteg lefejtése



3.23. ábra. A lefejtett plasztílin egyben kiemelve
(A képen Szabó János mérnökhallgató)

Az MSZ 4798-1:2004 szerint a beton kopásállóságát legalább 28 napos korú betonon az MSZ 18290-1:1981 szabvány szerint Böhme-féle eljárással kell vizsgálni. A térfogatvesztésget mm^3 -ben adjuk meg következők szerint:

$$\Delta V = \left(1 - \frac{m'}{m}\right) \cdot V,$$

ahol ΔV a próbatetest térfogatvesztése, mm^3 ;

m a próbatetest tömege koptatás előtt, g;

m' a próbatetest tömege koptatás után, g;

V a próbatetest térfogata koptatás előtt, mm^3 .

A koptatást légszáraz próbatesteken, vízzel telített próbatesteken és a koptatótárcsára víz csöpögtetése közben is el kell végezni.

3.4.6. A beton hőtechnikai jellemzői és mérések

[Balázs (1984)]

3.4.6.1. A hőmérséklet és mérése

A hőmérséklet a testek hőállapotának a jellemzésére szolgál. A test hőmérsékletét molekuláinak mozgásenergiája határozza meg. A hőmozgás elmélete szerint a testek legkisebb részecskéi, molekulái állandóan mozognak. E molekulák mozgásának minősége az anyag részecskéit összekötő belső erőktől függ. A szilárd testek molekulái zárt pályán mozognak, ún. rezgőmozgást végeznek. A folyadékok molekulái már kevésbé kötött pályán mozognak, míg a gázmolekulák között nincs kohézió, és így egyenesvonalú egyenletes mozgásban vannak mindaddig, amíg határoló falba nem ütköznek.

A hőmérséklet legáltalánosabban használt mértékegysége a °C, melynek 0 pontja a desztillált víz fagyáspontja. 100 °C a desztillált víz forráspontja. Az SI-rendszerben alapegysége a Kelvin fok (jele: K). 0 pontja az abszolút nullafok (-273,15 °C), amikor is a molekulák hőmozgása elvileg megszűnik.

Az építő gyakorlatban használt hőmérők:

- folyadék hőmérők;
- termoelemes hőmérők;
- ellenállás-hőmérők;
- termisztoros hőmérők.

A **folyadék hőmérők** azon az elven működnek, hogy a folyadék a folyadékot tartalmazó edényhez képest térfogatát a hőmérséklet-változás hatására megváltoztatja. A folyadék fajtája szerint vannak:

Légmentes higanyos hőmérők, méréshatáruk -39—+300 °C. A higanyos hőmérők felső mérési határa növelhető úgy, hogy a higany feletti teret nyomás alatti nitrogén vagy szén-dioxid tölti ki.

Alkoholos hőmérők, méréshatáruk az alkohol fajtájától függően különböző, pl. etil-alkohol esetén -110—+50 °C-ig.

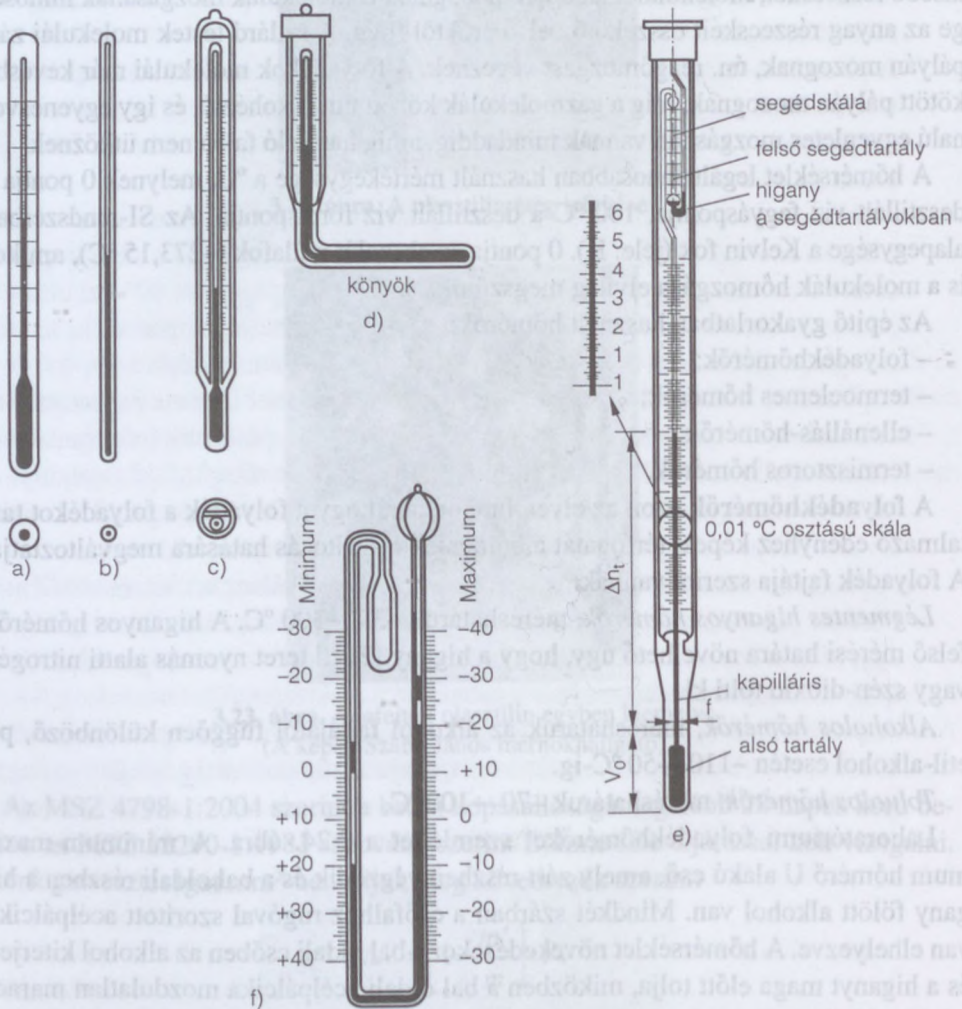
Toluolos hőmérők, méréshatáruk -70—+100 °C.

Laboratóriumi folyadék hőmérőket szemléltet a 3.24. ábra. A minimum-maximum hőmérő U alakú cső, amely zárt részben végződik és a bal oldali részben a higany fölött alkohol van. Mindkét szárban a csőfalhoz rugóval szorított acélpálcika van elhelyezve. A hőmérséklet növekedésekor a bal oldali csőben az alkohol kiterjed és a higanyt maga előtt tolja, miközben a bal oldali acélpálcika mozdulatlan marad, a jobb oldalit pedig a higany maga előtt tolja. Hőmérséklet-csökkenéskor fordított a helyzet. Így a hőmérő mindaddig mutatja a maximum és minimum hőmérsékletet, amíg az acélpálcikát a higanypontra mágnissel le nem húzzuk.

A **termoelemes hőmérők** (3.25. ábra) azon az elven működnek, hogy két különböző fémből vagy fémötvözetből álló dróthuzal forrasztása helyén a hőmérséklet hatására elektromos feszültség keletkezik, mely arányos a forrasztási pont és a hőelem másik

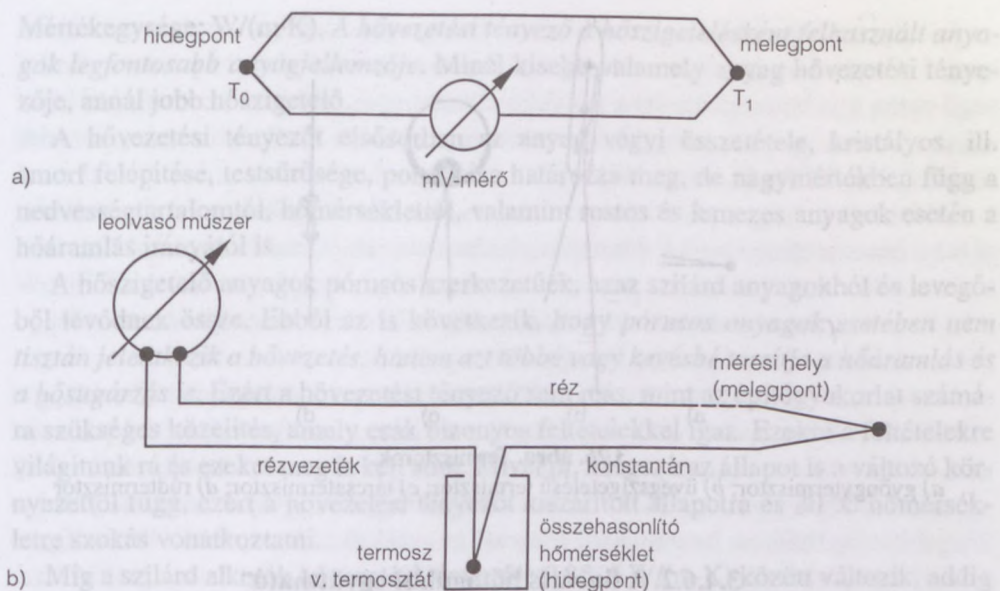
(összehasonlító) pontja között uralkodó hőmérséklet-különbséggel. A mérőpontot melegpontnak, az összehasonlító pontot hidegpontnak is nevezzük. Fontos, hogy a meleg és a hidegpont között minél nagyobb hőmérséklet-különbség legyen. A hidegpontot rendszerint $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra választjuk, amit olvadó jégben állítunk elő. E hőmérők felhasználhatók az anyagok belső hőmérsékletének mérésére (pl. beton, fal stb. esetén).

A termoelem annál érzékenyebb, minél nagyobb a termofeszültség. Leggyakrabban réz-konstantán termoelemet használunk.



3.24. ábra. Laboratóriumi folyadékos hőmérők. a) bothőmérő; b) fonálhőmérő; c) és d) lemezskálás hőmérő; e) Beckmann-hőmérő; f) minimum-maximum hőmérő

A termoelemeket szigetetlen vagy szigetelt huzalból készítik. Vannak műanyag, kerámia, porcelán szigetelésű huzalok. Szükség esetén a huzalokat védőcsőbe kell tenni. A mérés vázlatát szemlélteti a 3.25b ábra.



3.25. ábra. A termoelemes hőmérő.

a) működési elve; b) szokásos műszercsatlakozás

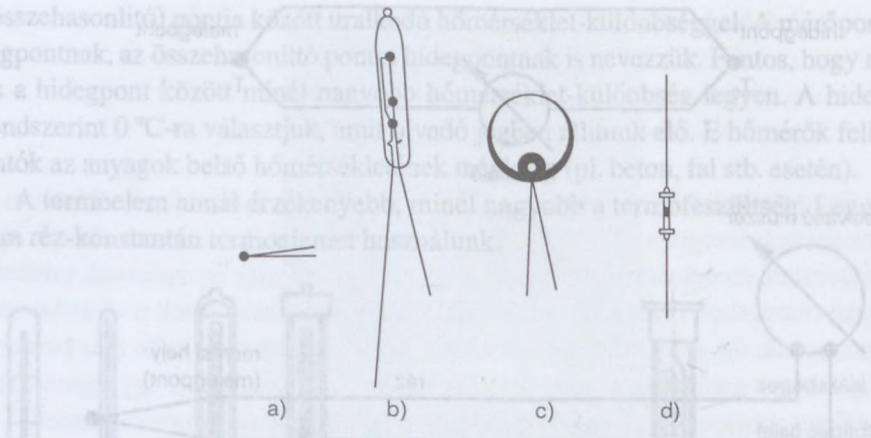
Az **ellenállás-hőmérők** működésének alapelve az, hogy a fémek ohmikus ellenállása a hőmérsékletükkel arányosan változik meg. E hőmérők nagy pontossággal mérik a hőmérsékletet. Az ellenállás és a hőmérséklet közötti összefüggést az anyag ellenállásának a hőmérséklet-tényezője jellemzi, amely megadja az anyag fajlagos ellenállásának növekedését $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet-növekedés hatására. Így pl. a platina ellenállásának hőmérséklet-tényezője $3,85 \cdot 10^{-3}$, hőmérsékletmérési határa $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tól $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig.

Mérőhuzalként $0,05\text{--}0,3\text{ mm}$ átmérőjű tiszta platina, tiszta nikkel- és kivételesen rézhuzalt használunk. A nikkel ellenálláshuzal gyorsan, a rézhuzal igen gyorsan oxidálódik. Ez a körülmény korlátozza felhasználhatóságukat.

Az ellenálláshőmérők alkalmasak hosszantartó hőmérsékletmérésre. A hőmérséklet időbeni alakulását hatszíníróval vagy más eszközzel regisztrálni lehet.

A **termisztoros hőmérők** azon az elven működnek, hogy a fém-oxidokból sajtolással és zsugorítással előállított félvezetők villamos ellenállása csökken a hőmérséklet növelésével. Előnyük, hogy kis tömegűek, ezért pontszerű hőmérsékletmérésre használhatók, gyorsan átveszik a hőt a környezettől, tehát gyors hőmérséklet-változások mérésére alkalmasak, végül kis tömegük miatt a környezet hőmérséklete nem befolyásolja számottevően.

Alakjuk változatos (3.26. ábra). Hőmérséklet-tartományuk általában $-100\text{--}+400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Fajlagos ellenállásuk a hőmérséklettel nem változik lineárisan és nagyságrendekkel nagyobb, mint az ellenállás-hőmérőké. A termisztorok hőmérséklet-tényezője idővel változik, ezért közvetlenül mérés előtt hitelesíteni kell azokat.



3.26. ábra. Termisztorok.

a) gyöngytermisztor; b) üvegszigetelésű termisztor; c) tárcsatermisztor; d) rúdtermisztor

3.4.6.2. A lineáris hőtágulási együttható

Hőmérséklet hatására a rúd vagy pálca alakú testek megnyúlnak, illetve összehúzódnak. A hosszváltás kifejezhető a következő képlettel:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T \text{ (mm)},$$

ahol l a test eredeti hossza mm-ben,

ΔT a hőmérséklet-különbség °C-ban,

α az anyag lineáris hőtágulási együtthatója, 1/°C.

Tehát az anyagnak azt a tulajdonságát, hogy 1 °C hőmérséklet hatására egységnyi hosszát milyen mértékben változtatja, lineáris hőtágulási együtthatónak nevezik. Ha az anyag nem rúdszerű, akkor hőtágulását térfogati hőtágulási együtthatóval jellemzik. Megjegyezzük, hogy anizotrop anyagok (pl. kvarc) hőtágulási együtthatója a különböző irányokban különböző.

3.4.6.3. A hő terjedését kifejező anyagjellemzők

A hő háromféleképpen terjedhet, nevezetesen vezetés, áramlás és sugárzás útján.

Hővezetés esetén a hő a szilárd anyagban részecskéről részecskére terjed, a melegebb részecskéről a hidegebbekre, miközben az egymással érintkező részecskék makroszkopikus léptékben nyugalomban vannak. Hővezetésről tehát csak szilárd anyagban beszélhetünk.

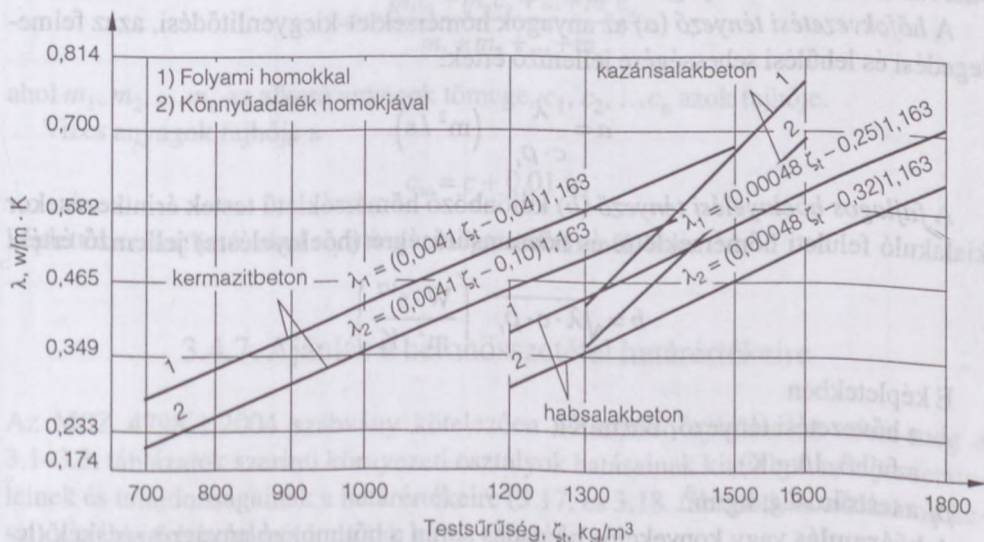
Az anyag hővezető képességét a **hővezetési tényezővel** (λ) jellemezzük, amely az a hőmennyiség J-ban kifejezve, ami 1 m² felületű, 1 m vastag falon állandósult hőáramban 1 óra alatt átvezetődik, ha a fal két oldalán a hőmérséklet-különbség 1 °C.

Mértékegysége: $W/(m \cdot K)$. A hővezetési tényező a hőszigetelésként felhasznált anyagok legfontosabb anyagjellemzője. Minél kisebb valamely anyag hővezetési tényezője, annál jobb hőszigetelő.

A hővezetési tényezőt elsősorban az anyag vegyi összetétele, kristályos, ill. amorf felépítése, testsűrűsége, porozitása határozza meg, de nagymértékben függ a nedvességtartalomtól, hőmérséklettől, valamint rostos és lemezes anyagok esetén a hőáramlás irányától is.

A hőszigetelő anyagok pórusos szerkezetűek, azaz szilárd anyagokból és levegőből tevődnek össze. Ebből az is következik, hogy pórusos anyagok esetében nem tisztán jelentkezik a hővezetés, hanem azt többé vagy kevésbé torzítja a hőáramlás és a hőszugárzás is. Ezért a hővezetési tényező sem más, mint az építőgyakorlat számára szükséges közelítés, amely csak bizonyos feltételekkel igaz. Ezekre a feltételekre világítunk rá és ezeket meg is kell adni. Mivel pl. a légszáraz állapot is a változó környezettől függ, ezért a hővezetési tényezőt kiszáritott állapotra és $20^\circ C$ hőmérsékletre szokás vonatkoztatni.

Míg a szilárd alkotók hővezetési tényezője $0,35-6 W/(m \cdot K)$ között változik, addig a nyugvó levegőé $0,023 W/(m \cdot K)$. Továbbá a szilárd anyagok sűrűsége is lényegesen nagyobb, mint a levegőé, a hőszigeteléshez felhasznált szervetlen anyagoké $2400-2800 kg/m^3$, a szerveseké pedig $1150-1560 kg/m^3$, ugyanakkor a levegőé csak $1,3 kg/m^3$. A szilárd anyagrészek közötti levegő mennyiségének a változását azonban jól kifejezhetjük a testsűrűség változásával. Azt állíthatjuk tehát, hogy általában valamely anyag testsűrűsége és hővezetési tényezője között közelítően lineáris összefüggés van (3.27. ábra). Annál kisebb valamely anyag hővezetési tényezője, minél kisebb a testsűrűsége.



3.27. ábra. Összefüggés a hővezetési tényező és a könnyűbeton testsűrűsége között

Adott porozitás esetén a pórusok mérete is lényeges. Ugyanis a pórusméret csökkenésével rohamosan csökken a levegő hővezető képessége, mivel a pórusba zárt levegő egyre inkább megközelíti a nyugalmi állapotot, és csökken a konvekciós hőátadás mértéke. Így pl. a levegő hővezetési tényezője 10; 5, ill. 0,6 mm-es pórusok esetén 0,066; 0,044, ill. 0,025 W/(m·K).

Előfordulhat, hogy a testsűrűség csökkenésével, illetve a pórustérfogat növekedésével a hővezetési tényező a minimum elérése után ismét emelkedni kezd. Ez elsősorban akkor fordul elő, ha a pórusok egymással összefüggő pórusrendszert alkotnak. Ennek a jelenségnek az az oka, hogy a pórusok mérete megnő és az összefüggő pórusokban a hőáramlás hatása is nagyobb.

Lemezes, rostos szerkezetű anyagok hővezetési tényezője nagymértékben függ a rostok és a hőáramlás irányától. Ha a rostok és a hőáram iránya egymással párhuzamos, akkor a hővezetési tényezőjük kétszer, háromszor akkora is lehet, mintha ezek egymásra merőlegesek. Így pl. 160 kg/m³ testsűrűségű üvegyapot hővezetési tényezője abban az esetben, ha a hőáram a rostok irányára merőleges, 0,037 W/(m·K), ha pedig azzal párhuzamos, akkor 0,080 W/(m·K). Hasonlóan alakul faanyagok hővezetési tényezője is.

A hővezetési tényezőt az *anyag kristálytani felépítése* is befolyásolja. Ugyanis az üveges szerkezetű anyagok hővezetési tényezője kisebb, mint az ugyanolyan összetételű kristályos anyagoké.

A *nedvességtartalom* a hővezetési tényezőt lényegesen befolyásolja. A víz a pórusokat többé-kevésbé kitöltheti. A hővezetési tényezőt a víz azért növeli, mert a víz hővezetési tényezője átlagosan 0,58 W/(m·K)-re tehető, tehát kb. 25-öszer jobb hővezető a levegőnél. A nedvességtartalomnak a hővezetési tényezőre gyakorolt hatása szerves és szervetlen anyagoknál különböző.

A *hőfokvezetési tényező* (*a*) az anyagok hőmérséklet-kiegyenlítődési, azaz felmelegedési és lehűlési sebességére jellemző érték:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_t} \quad (\text{m}^2 / \text{s}).$$

A *fajlagos hőelnyelési tényező* (*b*) különböző hőmérsékletű testek érintkezésekor kialakuló felületi hőmérsékletre és hőáramsűrűsége (hőelnyelésre) jellemző érték:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho_t} \quad \left(\frac{\text{W} \cdot \text{s}^{1/2}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right).$$

E képletekben

λ a hővezetési tényező, W/(m·K);

c a fajhő, J/kg·K);

ρ_t a testsűrűség, kg/m³.

A *hőáramlás* vagy konvekciós hőátadás során a hőt mozgó anyagrészek (levegő, gáz, folyadék) közvetítik. Épületszerkezetek határoló felületein a hőcsere hő-

átadás (konvekció) útján megy végbe. Nevezetesen a szilárd anyagból a levegőbe (tartály esetén a folyadékba), ill. fordítva hő adódik át, mégpedig a melegebb közegből a hidegebbe. A hőátadás intenzitása attól függ, hogy a folyadék vagy gáz milyen sebességgel és milyen irányból ütközik a felületre. A legnagyobb természetes áramlás a szél hatására, mesterséges áramlás a függőleges felület menti felmelegedés és lehűlés hatására alakul ki.

A hőátadást a hőátadási tényezővel (α_c) fejezzük ki, melynek mértékegysége $W/(m^2 \cdot K)$.

Hősugárzás esetén a hő elektromágneses hullámok alakjában terjed és a melegebb testről a sugarakat el nem nyelő közegeken keresztül jut a hidegebb testre. A szilárd anyagrészeket elválasztó levegő eközben rendszerint nem melegedik fel. Tehát nincs közvetítő közeg. Jelentősége egyrészt a napsugárzás elleni védelem terén van. A felületek hőmérsékletüktől és minőségüktől függően állandóan sugároznak ki és nyelnek el hősugarakat. „Ökölszabályként” fogadható el az a felfogás, hogy sugárzó hőleadás vagy hőfelvétel hőmérséklet-különbség hatására megy végbe, és mindig a melegebb felületről a hidegebb felé irányul. Ebben az értelemben a sugárzásos felületi hőátadás tényezője α_s , mértékegysége W/m^2 .

3.4.6.4. A fajhő

A **fajhő** (c) az a hőmennyiség, amely 1 kg tömegű anyag hőmérsékletét 1 °C-kal (1 K-nel) növeli. Mértékegysége: $kJ/(kg \cdot K)$. A víz fajhője $4,187 \text{ kJ/kg} \cdot K$. Ha az anyag több, különböző fajhőjű anyag keveréke, akkor az átlagos fajhő:

$$c = \frac{m_1 c_1 + m_2 c_2 + \dots + m_n c_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n},$$

ahol m_1, m_2, \dots, m_n az alkotó anyagok tömege, c_1, c_2, \dots, c_n azok fajhője.

Vizes anyagok fajhője a

$$c_w = c + 0,01 w_i$$

képlettel számítható, ahol w_i a nedvességtartalom m%-ban.

3.4.7. Ajánlás a betonösszetétel határértékeire

Az MSZ 4798-1:2004 szabvány kötelezően betartandó ajánlásokat adott meg a 3.1–3.3. táblázatok szerinti környezeti osztályok hatásainak kitett betonok összetételének és tulajdonságainak a határértékeire (3.17. és 3.18. táblázat). A táblázatok készítői alábbi feltételekből indultak ki:

- A beton (vasbeton) tervezett élettartama 50 év.

3.17. táblázat. Ajánlott (Magyarországon előírt) határértékek a beton összetételére és tulajdonságaira

Kitéti (környezeti) osztály jele	Kitéti (környezeti) osztályok																	
	Karbonátosodás okozta korrózió				Tengervíz (Magyarországon csak különleges esetekben használatos)			Nem tengervízből származó klorid			Fagyás-olvadás okozta korrózió		Agresszív kémiai hatás (csak természetes talaj és talajvíz környezetében)					
	XC0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
A korrózióknak vagy a rozsdásodásnak nincs kockázata	X0																	
A legnagyobb w/c	-	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45
A legkisebb szilárdági osztály ^{c)}	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
A legkisebb cementtartalom, kg/m ³	-	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
A legkisebb (képzett) levegőtartalom, térfogat-százalék	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0 ^{a)}	4,0 ^{b)}	4,0 ^{a)}	-	-	-
A frissbeton levegőtartalma max. térfogat-százalék	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4-6	4-6	4-6	2	2	2

- Cementfajta jele CEM I 32,5.
- $d_{\max} = 20\text{--}32$ mm.
- A legnagyobb víz–cement tényezőre és a legkisebb cementtartalomra előírt értékeket minden esetben alkalmazni kell, míg a beton szilárdsági osztályát kiégésztésként lehet előírni.

Ha a megengedett legnagyobb víz–cement tényező a megengedett legkisebb cementtartalom esetén a szükséges konzisztencia beállításához nem elegendő, akkor a konzisztenciát – a 3.17. és 3.18. táblázatban előírt víz–cement tényező betartása mellett – képlékenyítő vagy folyósító adalékszerrel, vagy kisebb vízigényű adalékanyag felhasználásával kell megfelelővé tenni.

A 3.17. és 3.18. táblázatban a betonok előírt testsűrűségének számításához a CEM I 32,5 jelű cementet 3100 kg/m^3 , a szulfátálló cementet 3200 kg/m^3 sűrűséggel vették figyelembe. A betonok testsűrűségét 2640 kg/m^3 testsűrűségű homokos kavics adalékanyag feltételezésével, a kopásálló zúzottkőbeton testsűrűségét 40 tömegszázalék 2640 kg/m^3 testsűrűségű homok és 60 tömegszázalék 2850 kg/m^3 testsűrűségű zúzottkő adalékanyag feltételezésével határozták meg. Ettől eltérő testsűrűségek esetén az előírt értékek korrigálандók.

A 3.17. és 3.18. táblázatban a frissbeton megkövetelt testsűrűségét általában 2 térfogatszázalék levegőtartalom feltételezésével számították ki.

A 3.17. táblázatban a légbuborékképző szerrel készített beton (XF2, XF3, XF4 környezeti osztály) esetén az $L \geq 4$ térfogatszázalék bevitt levegőtartalomnak megfelelően a friss beton megengedett testsűrűségét 6 térfogatszázalék levegőtartalom feltételezésével adták meg.

A 3.18. táblázatban a frissbeton előírt testsűrűségét kopásálló zúzottkő beton [XK1(H), (XK2(H), (XK3(H), (XK4(H) környezeti osztály] esetén 3 térfogatszázalék levegőtartalom, vízzáró beton [XV1(H), (XV2(H), (XV3(H) környezeti osztály] esetén 1 térfogatszázalék levegőtartalom feltételezésével számították ki.

A 3.17. és a 3.18. táblázatokban a 28 napos korú, szilárd, (60 ± 5) °C hőmérsékleten tömegállandóságig szárított beton testsűrűségét viszonylag jó közelítéssel a cement tömegére vetített 30 tömegszázalék el nem párologtatható víz, azaz $v/c = 0,3$ liter/ m^3 elpárolgó keverővíz feltételezésével adták meg.

Ha a betonkészítés feltételei ettől eltérnek, akkor a betonösszetételt betontechnológus tervezze meg. De ekkor sem szabad a cementtartalmat a táblázatban megadott érték alá csökkenteni, és a víz–cement tényezőt a megadott érték fölé növelni.

A tervezett (és az előírt) beton megnevezése, jelölése

A beton jelét a terven eddig is fel kellett tüntetni. Az eltérés annyi, hogy az MSZ 4798-1:2004 szabvány szerinti jelölések nem egyeznek a korábbiakkal.

A jelölésnek tartalmaznia kell az alábbiakat:

- A beton nyomószilárdsági osztályát (3.4. és 3.5. táblázat), nehézbeton esetén a HC jelet. Könnyűbeton esetén az LC jelen kívül a könnyűbeton testsűrűségi osztályát is meg kell adni.

- Ha az adalékanyag nem homokos kavics, akkor az adalékanyag fajtáját (pl. zúzott kő mészkőből, riolittufából), ill. a könnyű adalékanyagot is meg kell nevezni.
- Meg kell adni a környezeti osztályt.
- Az adalékanyag legnagyobb névleges szemmagyságát, esetleg a szemmegoszlás jellemzését.
- A beton konzisztencia osztályát.
- Ha a beton megengedett kloridion-tartalma a cement tömegére vonatkoztatott <0,2%, csak akkor kell megadni, ha a követelmény ennél szigorúbb (pl. feszített vasbeton).
- Ha a tervező (kiíró) a cement fajtáját is előírja, akkor ezt a beton jelében – a konzisztenciaosztály jele után kell – feltüntetni.
- Ha a beton használati élettartama 50 év (vagy annál kisebb), akkor a beton jelében nem kell megadni. Ha ennél nagyobb, akkor szerepeltetni kell.
- A hivatkozott szabvány számát.

Példák az MSZ 4798-1:2004 szabványból:

3.3. példa. Annak a C30/37 nyomószilárdsági osztályú betonnak (közönséges betonnak) a jele, amelyből vasbeton keretszerkezet épül (környezeti osztály: XC3), névleges legnagyobb szemmagysága $d_{\max} = 24$ mm, konzisztenciája képlékeny és a tervezés idején ismeretes, hogy a konzisztenciát roskadásméréssel fogják vagy roskadásméréssel kell meghatározni, és a roskadási mértéknek 50–90 mm közé kell esnie, tehát konzisztenciaosztály S2, a következő:

C30/37 – XC3 – 24 – S2 – MSZ 4798-1:2004

3.4. példa. Annak a C30/37 nyomószilárdsági osztályú betonnak (közönséges betonnak) a jele, amelyből vasbeton keretszerkezet épül (környezeti osztály: XC3), névleges legnagyobb szemmagysága $d_{\max} = 24$ mm, konzisztenciája képlékeny és a konzisztencia megnevezése tájékoztató jelleggel – ha a szerkezet tervezés idején a konzisztenciamérés módszerének mibenléte még nem ismert – „*Képlékeny*”, a következő:

C30/37 – XC3 – 24 – „*Képlékeny*”, – MSZ 4798-1:2004

3.5. példa. Annak a C30/37 nyomószilárdsági osztályú, légbuborékképző adalékszerrel gyártott (közönséges) betonnak a jele, amelyből fagy és sózás hatásának kitett vasbeton hid pályaszegélye készül (környezeti osztály: XF4), névleges legnagyobb szemmagysága $d_{\max} = 32$ mm, konzisztenciája képlékeny és területi mértéke 420–480 mm közé esik, konzisztenciaosztály F3, a következő:

C30/37 – XF4 – 32 – F3 – MSZ 4798-1:2004 vagy

C30/37 – XF4 – 32 – F3 – (420–480 mm) – MSZ 4798-1:2004

3.6. példa. Annak a C40/50 nyomószilárdsági osztályú, kopásálló, légbuborékképző adalékszer nélkül gyártott (közönséges) bazaltbetonnak a jele, amelyből kopatóhatásnak és fagy és sózás hatásának kitett beton térburkolat készül (környezeti osztály: XK3(H) és XF4(H), névleges legnagyobb szemmagysága $d_{\max} = 32$ mm, konzisztenciája képlékeny és területi mértéke 420–480 mm közé esik, konzisztenciaosztály F3, a következő:

C40/50 – bazalt zúzottkővel – XK3(H)-XF4(H) – 32 – F3 – MSZ 4798-1:2004 vagy
C40/50 – bazalt zúzottkővel – XK3(H)-XF4(H) – 32 – F3 (450±30 mm) – MSZ 4798-1:2004

3.7. példa. Annak az LC12/13 nyomószilárdsági osztályú, könnyűbetonnak a jele, amelynek a testsűrűsége szilárd állapotban 1600–1800 kg/m³ közé esik, adalékanyaga duzzasztott agyagkavics, és amelyből könnyűbeton belső teherbíró fal épül (környezeti osztály: X0b(H), névleges legnagyobb szemnagysága $d_{\max} = 16$ mm, konzisztenciája a kissé képlékeny és a képlékeny határán van, konzisztenciaosztályának jele a tömörítési mérték jelével kifejezve C2, a következő:

LC12/13 – ρ_{LC} 1,8 – duzzasztott agyagkavicccsal – X0b(H) – 16 – C2 – MSZ 4798-1:2004 vagy

LC12/13 – ρ_{LC} 1,8 – duzzasztott agyagkavicccsal – X0b(H) – 16 – C2 (1,25-1,11) – MSZ 4798-1:2004

3.8. példa. Annak a C40/50 nyomószilárdsági osztályú (közönséges) betonnak a jele, amelyből esőtől védett helyen álló feszített vasbeton gerenda készül (környezeti osztály: XC3), névleges legnagyobb szemnagysága $d_{\max} = 24$ mm, konzisztenciája képlékeny és területi mértéke 420–480 mm közé esik, konzisztenciaosztálya F3, megengedett kloridtartalma a cement tömegszázalékában kifejezve 0,10 tömegszázalék, CEM 52,5 szilárdsági osztályú portlandcementtel készül, használati élettartama 100 év, a következő:

C40/50 – XC3 – 24 – F3 – Cl 0,10 – CEM 52,5 – 100 év – MSZ 4798-1:2004 vagy

C40/50 – XC3 – 24 – F3 (450±30 mm) – Cl 0,10 – CEM 52,5 – 100 év – MSZ 4798-1:2004

4. A beton szilárdulása hidegben

4.1. Az egyenértékű kor

A szakemberek, különösen a hideg időben végzett betonozások esetén, a kizsaluzási és a kiállványozási idő megállapítása során érezték egy olyan összefüggés hiányát, amellyel változó hőmérséklet esetén is jól megbecsülhető a beton szilárdsága.

Ez a törekvés vezetett ahhoz a gondolathoz, hogy a beton érettségi állapotát csak egy számmal jellemezzék, illetve csak egy adott hőmérsékleten (pl. 20 °C-on) megállapított szilárdulási görbéhez viszonyítsák. Ennek az elképzelésnek az a kémiai magyarázata, hogy a kémiai folyamatokban, amilyen a cement szilárdulása is, a hőmérséklet növekedése a kémiai reakciók közel arányos meggyorsulását eredményezi. A szilárdság, amely a végbement reakciók bizonyos állapotát fejezi ki, a beton korának és a beton (tárolóter) hőmérsékletének a függvénye.

Ez az egy szám lett az **egyenértékű kor**.

Ezt használjuk a szélső szál szilárdságának a meghatározására a változó hőmérséklet esetén.

Az egyenértékű kor az az időtartam, amely alatt a beton 20 °C hőmérsékleten ugyanolyan szilárdságot ér el, mint t_i idő alatt T_i hőmérsékleten.

A legelső összefüggést Nurse állította fel 1949-ben a 100 °C-nál kisebb hőmérsékleten gőzölt cementekre és bevezette az **órafokszám** fogalmát.

Az irodalomban alábbi összefüggéseket találtuk:

1. RASTRUP: $t_{20} = t_i \cdot 2^{\frac{T_i - 20}{10}}$,

2. SAUL: $t_{20} = \frac{T_i - 10}{30} t_i$,

3. SECO-C. S. T. C.: $t_{20} = 0,3 \left(1 + \frac{T_i}{10} \right) t_i$.

A képletekben

T_i a beton hőmérséklete, °C,

t_i a beton kora, nap,

t_{20} az az egyenértékű időtartam (nap), amely alatt a beton 20 °C hőmérsékleten ugyanakkora szilárdságot ér el, mint t_i idő alatt T_i hőmérsékleten. Ha a hőmérséklet változik, akkor az egyenértékű kort összeggéssel kell meghatározni.

A képletek érvényességét többen ellenőrizték. *Nykänen Saul* képletét portlandcementekre érvényesnek ítélte 0 °C-nál nagyobb tárolási hőmérsékleten. *Rastrup* saját képlete érvényességi határául a +2–+45 °C-t adta meg. *Brandt* (1956) 30 féle cementtel végrehajtott kísérletei során érvényesnek találta *Saul* (1951) képletét 5–20 °C hőmérséklet-tartományban 325 és 225 jelű portlandcementekre. Ugyanakkor a 425 jelű pc. esetén felfelé, a heterogéncementek esetén lefelé tértek el az 5 °C-os, *Saul* (1951) szerint számított szilárdulási görbék a valóságostól. *Anmar–Dutron–Motten* és *Dubois* kísérletei szerint 0–10 °C hőmérséklet-tartományban a SECO-C. S. T. C. képlet, 5 °C hőmérsékleten a *Rastrup*-képlet adta a jobb közelítést. Megjegyzik azonban, hogy ezek a képletek csak közelítőek; és elsősorban tiszta portlandcementekre használhatók. Korábban mi is ellenőriztük a képletek érvényességét. *Szizov* és saját kísérleteink alapján úgy találtuk, hogy a 20 °C-nál kisebb hőmérsékleten tárolt beton szilárdsága a valóságban mindig kisebb volt, mint a fenti képletekkel kiszámított.

Megemlítem még *Walz* és *Bonzel* (1961), valamint *Brandt* (1956) kísérleteit.

4.2. Az egyenértékű kor heterogén portlandcementekre

4.2.1. A kísérlet

Hazánkban 1952-ben vezették be a heterogén portlandcementeket. Ekkor végeztük az első kísérleteket [*Balázs–Kilián*, 1953]]. Mivel hazánkban az év kb. felében hideg időben betonoznak és voltak rossz tapasztalatok is, az Építésügyi Minisztérium újabb kísérleteket kezdeményezett a BME Építőanyagok Tanszéken [*Balázs–Zsigovics* (1980)]. A második kísérlet 1979-ben az egyenértékű kor kiterjesztését eredményezte a heterogén portlandcementekre. Alábbiakban röviden ismertetjük e kísérlet eredményeit.

A kutatás során az alábbi cementekkel végeztünk kísérleteket:

- váci 450 pc; jele: V 450 pc (összehasonlításul),
- váci 350 kspc 20; jele: V 350 kspc 20,
- váci 350 kspc 40; jele: V 350 kspc 40,
- hejőcsabai 350 kspc 20; jele: H 350 kspc 20,
- hejőcsabai 350 kspc 40; jele: H 350 kspc 40,
- beremendi 350 ppc 10; B 350 ppc 10,
- beremendi 350 ppc 20; B 350 ppc 20.

A cementek megfeleltek a szabványos követelményeknek. A cementek kémiai és ásványi összetételét a 4.1. táblázat, szabványos nyomószilárdságát a 4.1., szabványos hajlító-húzószilárdságát a 4.2. ábra szemlélteti.

Az *adalékanyagot* a Mélyépítő Vállalat észak-pesti osztályozójából származó osztályozott és mosott adalékfrakciókból állítottuk elő ($d_{\max} = 16$ mm). Cementfajtánként 4-féle betont készítettünk, felét kb. B 200 jelű betonból, másik felét kb. B 400 minő-

ségüre terveztük. Betonfajtánként felét Melment L 10 képlékenyítővel állítottuk elő. A betonösszetételt a tájékoztató konzisztencia-mérőszámokkal együtt a 4.2. táblázatban foglaltuk össze.

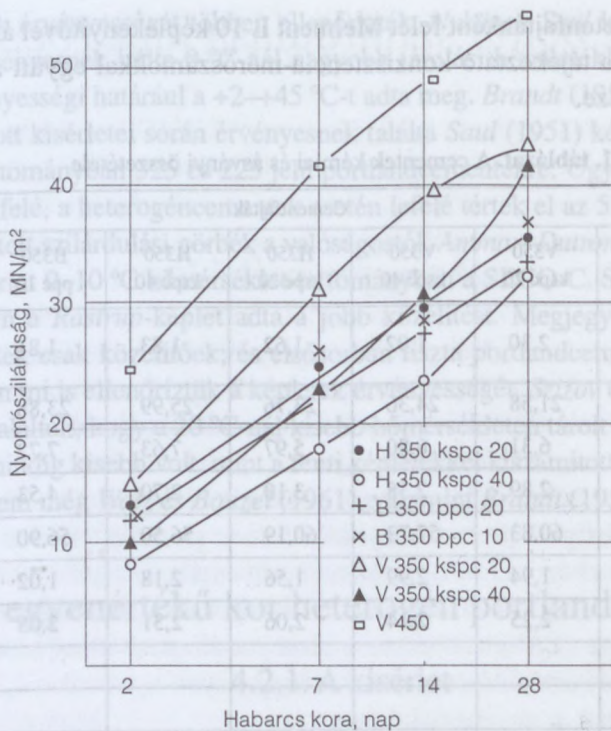
4.1. táblázat. A cementek kémiai és ásványi összetétele

Alkotó, %	Cementfajták						
	V450 pc	V350 kspc 20	V350 kspc 40	H350 kspc 20	H350 kspc 40	B350 ppc 10	B350 ppc 20
Izzítási vesztesség	3,75	2,30	1,02	1,62	1,83	1,81	2,34
SiO ₂	19,14	21,58	24,36	23,76	25,99	23,88	26,42
Al ₂ O ₃	6,37	6,31	6,80	5,97	7,63	7,72	8,23
Fe ₂ O ₃	3,25	2,89	2,38	3,10	2,70	4,53	5,22
CaO	62,62	60,83	57,73	60,19	56,50	56,90	53,80
MgO	1,49	1,94	2,99	1,56	2,18	1,02	0,76
SO ₃	2,62	2,25	2,14	2,06	2,31	2,05	2,34
C ₃ S	56,73						
C ₂ S	14,21						
C ₃ A	11,81						
C ₄ AF	10,25						
CaSO ₄	4,62						

4.2. táblázat. A betonok összetétele és tájékoztató konzisztencia-mérőszámai

Jele	Cement, kg/m ³	Víz-cement tényező	Folyósító adalékszer	Roskadás, cm	Terülés, cm
1	300	0,55	–	1–2	35–38
2	280	0,57	2 m% Melment L10	1–2	35–38
3	400	0,4	–	1–2	35–38
4	400	0,45	2 m% Melment L10	6–10	40–44

Asztalvibrátoros tömörítéssel 7×7×25 cm méretű hasábokat készítettünk. Az adalékanyagot előzetesen a tervezett hőmérsékleten tároltuk. A próbatesteket elkészítésük után sablonostól a megfelelő hőmérsékletű térbe helyeztük, majd kiszaluzás után mésztelített vízben tároltuk. A víz hőmérséklete ±0,5 °C hőmérsékleten belül meggyezett a tervezett hőmérséklettel. A vízben tárolást azért választottuk, mert így tudtuk biztosítani a hőmérséklet állandóságát és az egyenletes nedvesen tartást. Ennek a hatására kicsi volt a szilárdsági eredmények szórása.



4.1. ábra. A szabványos cementhabarcs nyomószilárdsága a habarcs kora függvényében

A vizsgálat időpontjában a vízből kivett próbatesteken először 21 cm-es támaszközön, harmadpontos erővel terhelve meghatároztuk a *hajlító–húzószilárdságot*, majd az elhajlított próbatestek végein – 50 cm²-es nyomólappal terhelve – a *nyomó(test)-szilárdságot*.

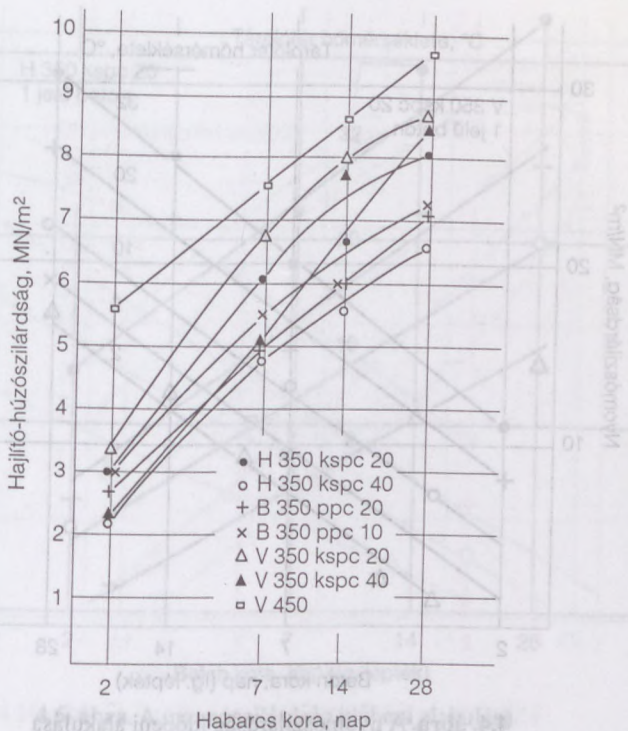
4.2.2. A kísérleti eredmények és értékelésük

Valamennyi beton esetében először a kísérleti eredményeket a beton kora függvényében ábráztuk. Egy-egy mérési eredménynek nyomószilárdság esetében 6, hajlító–húzószilárdság esetében 3 szilárdság átlagát tekintettük.

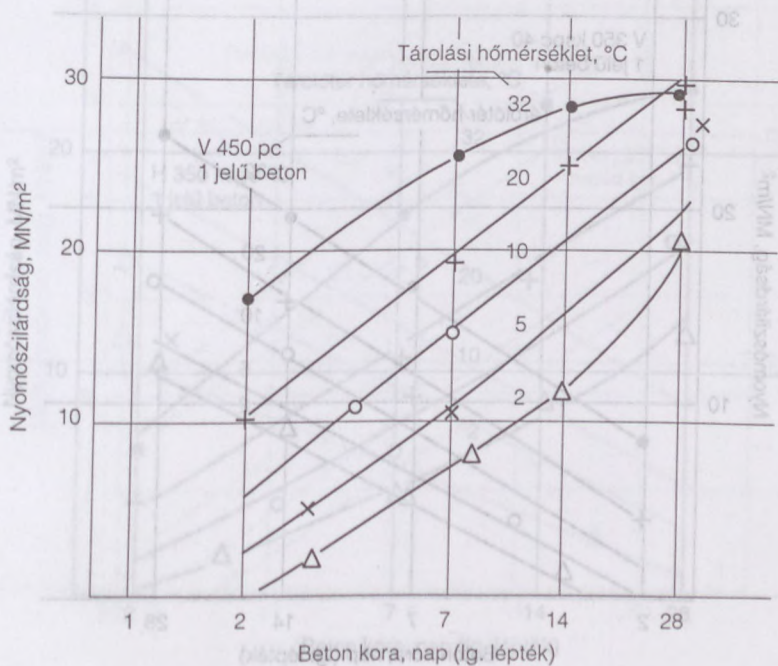
Második lépésként megrajzoltuk a szilárdságok kiegyenlítő vonalát ugyanazokon az ábrákon [példának az 1 jelű betonok nyomószilárdságát (4.3–4.9. ábra) és hajlító–húzószilárdságát (4.10–4.16. ábra) mutatjuk be].

Harmadik lépésben megrajzoltuk a relatív nyomó- és hajlító–húzószilárdságok ábráját (példának az 1 jelű betonok közül a 350 kspc 20 jelű cementtel készített betonokét szemléltetjük (4.17.–4.18. ábra).

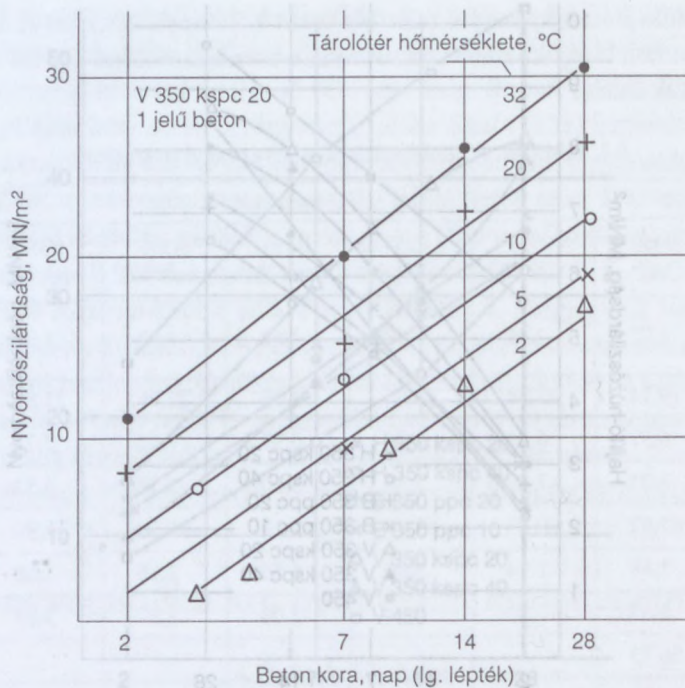
Negyedik lépésben ábráztuk a relatív nyomó- és hajlító–húzószilárdságokat a hőmérséklet függvényében (példa 4.19a és 4.19b ábra).



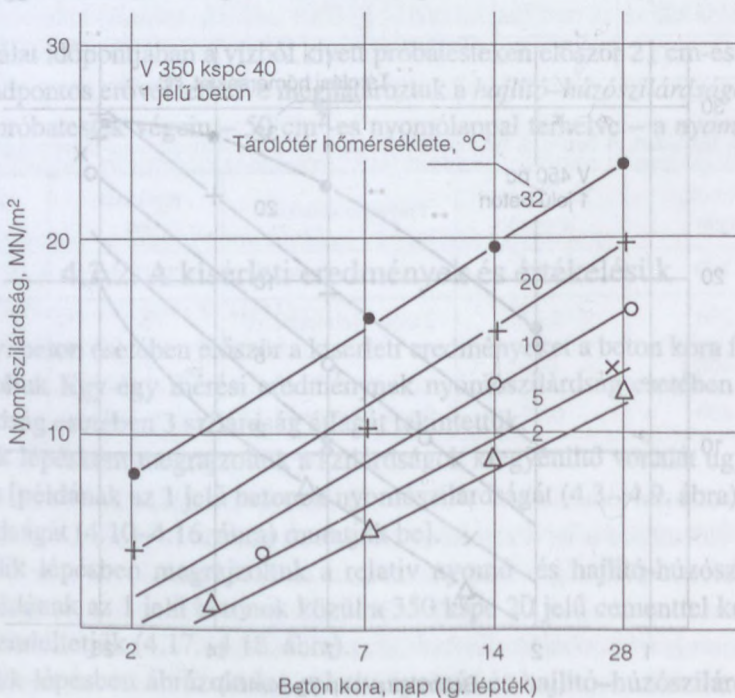
4.2. ábra. A szabványos cementhabarcs hajlító-húzószilárdsága a habarcs kora függvényében



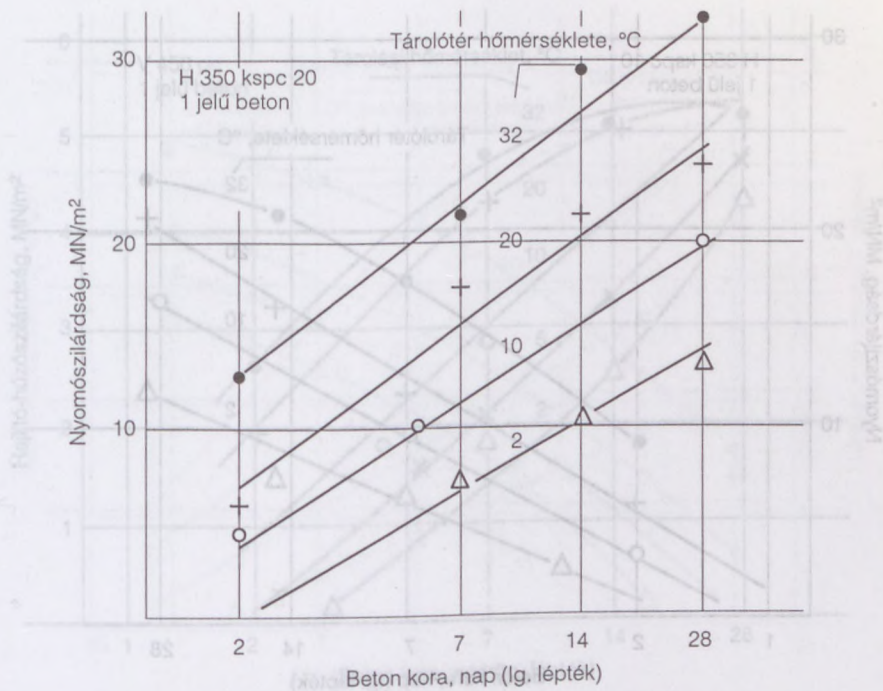
4.3. ábra. A nyomószilárdság időbeni alakulása



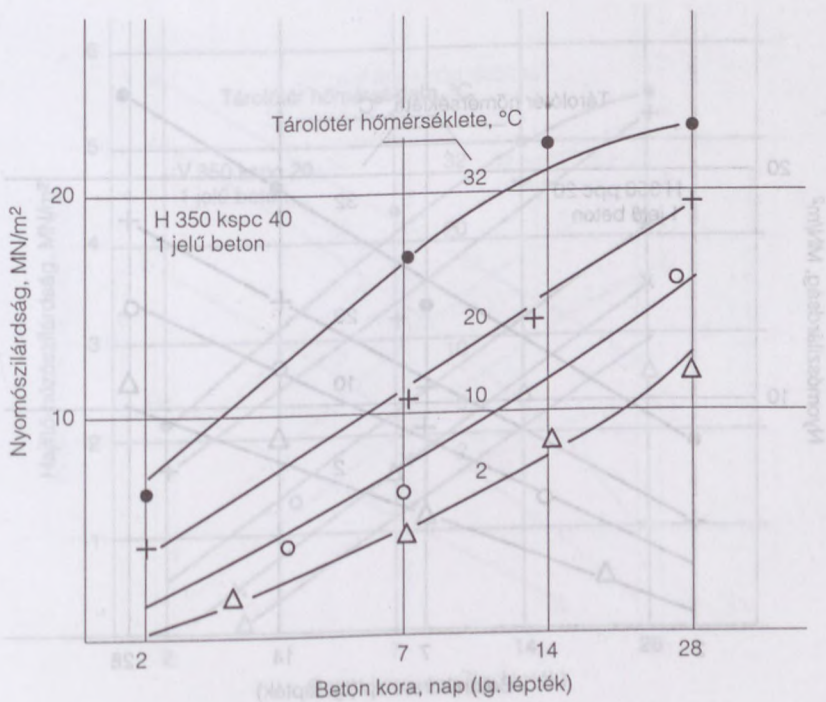
4.4. ábra. A nyomószilárdság időbeni alakulása



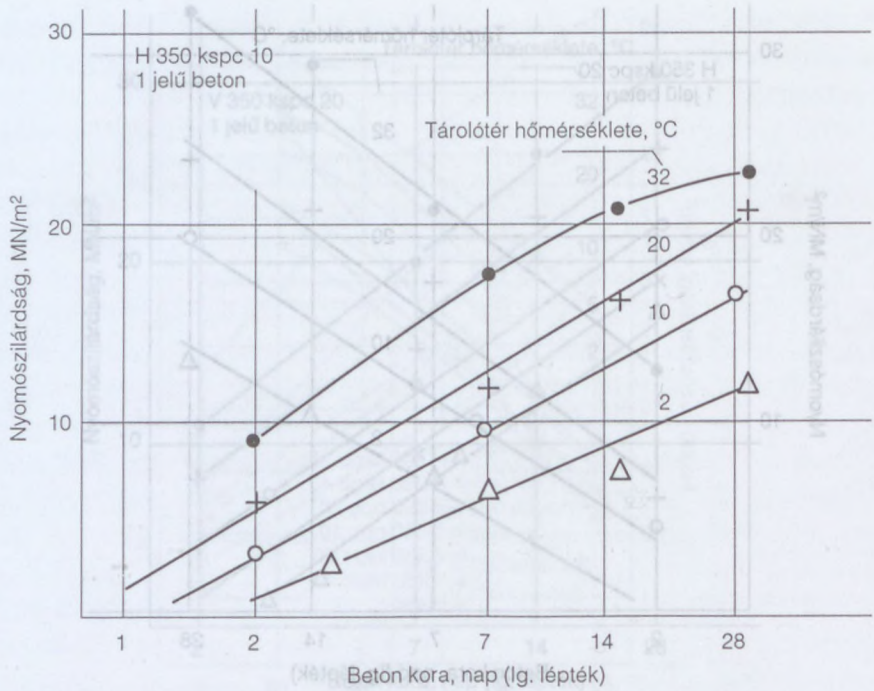
4.5. ábra. A nyomószilárdság időbeni alakulása



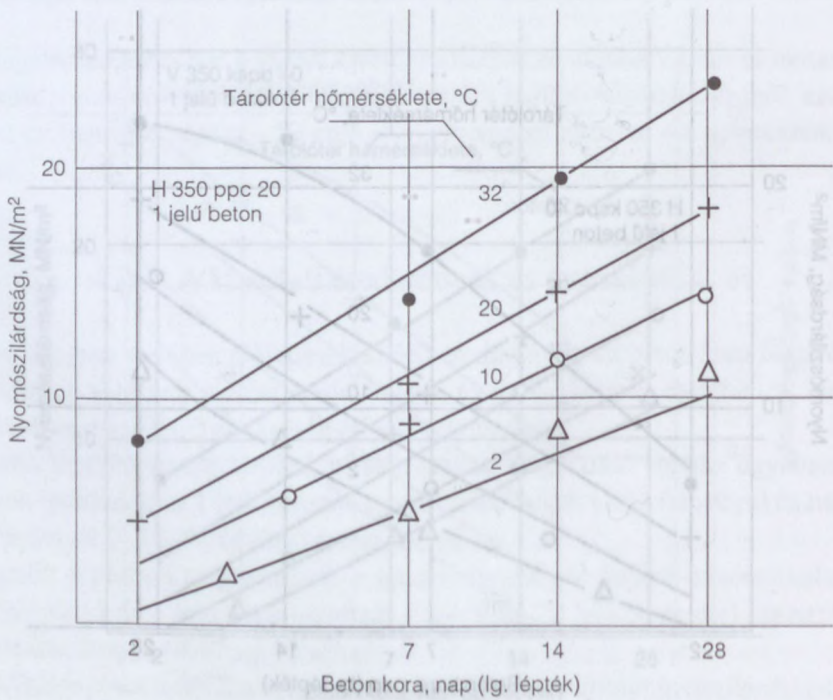
4.6. ábra. A nyomószilárdság időbeni alakulása



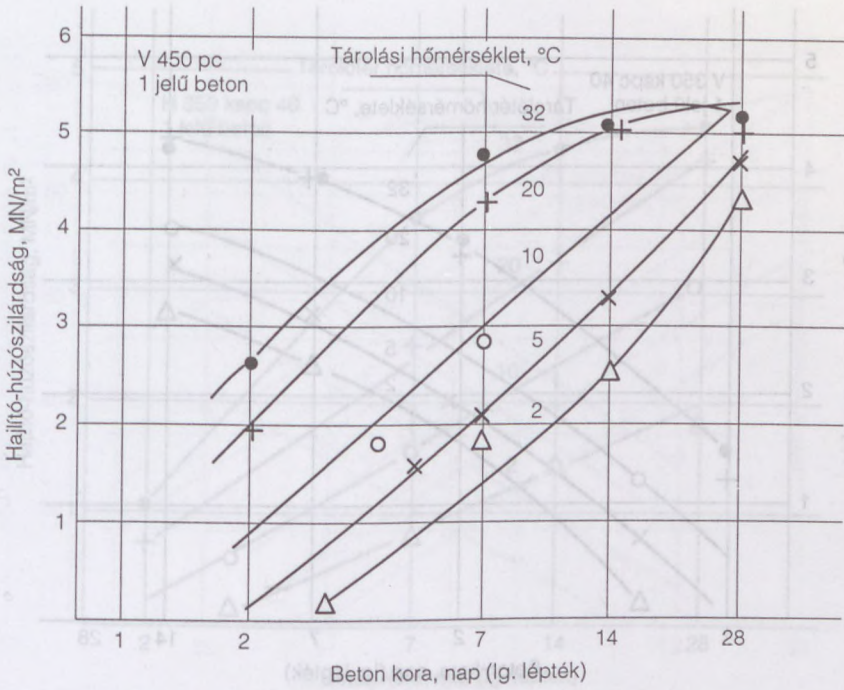
4.7. ábra. A nyomószilárdság időbeni alakulása



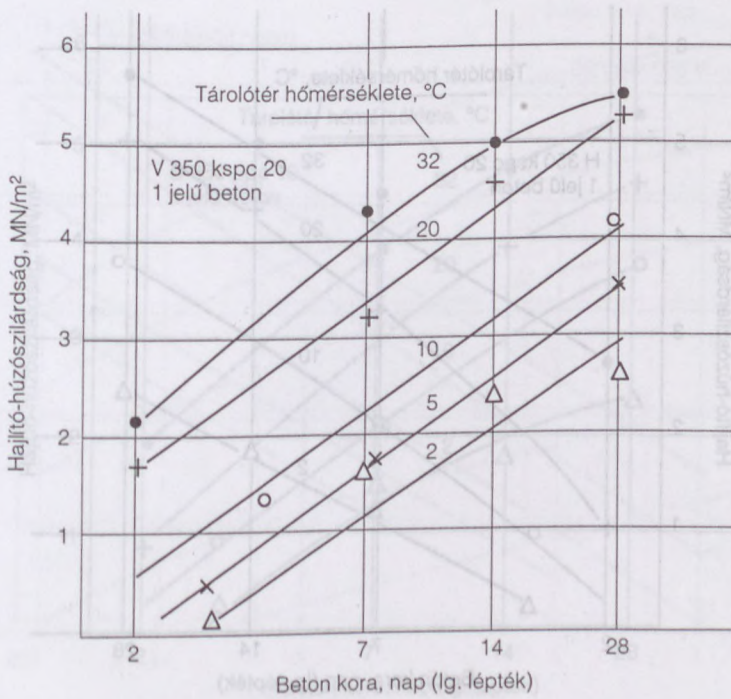
4.8. ábra. A nyomószilárdság időbeni alakulása



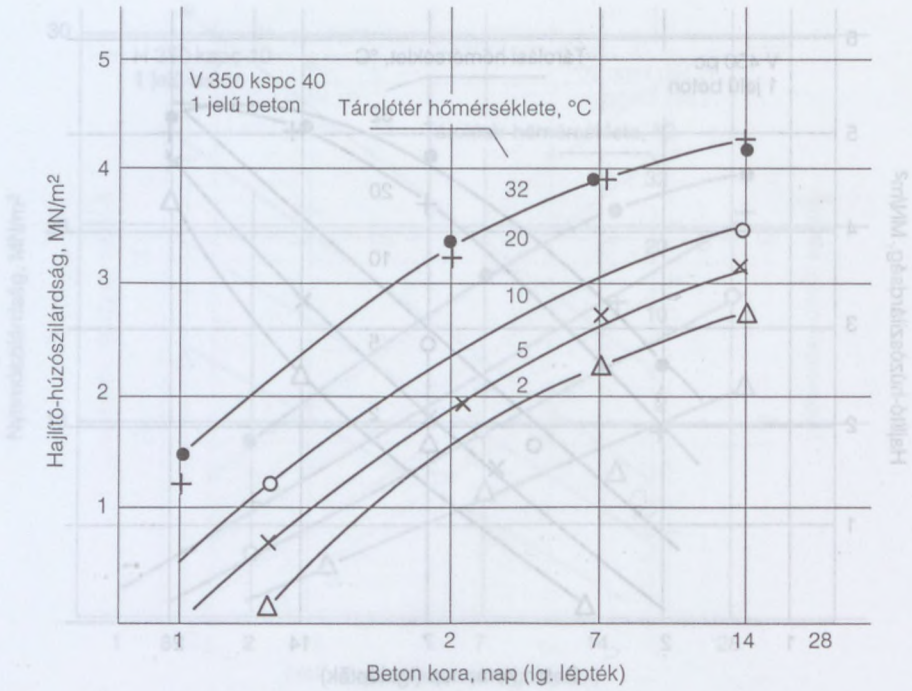
4.9. ábra. A nyomószilárdság időbeni alakulása



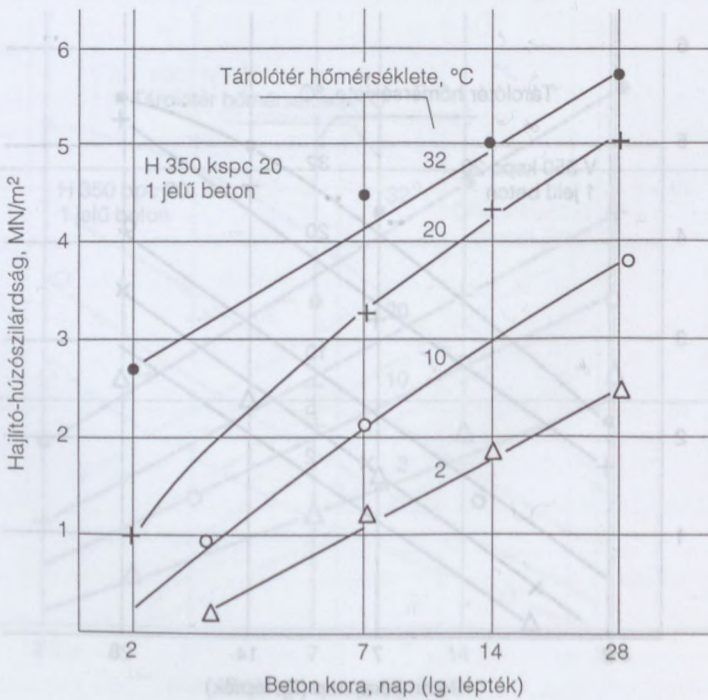
4.10. ábra. A hajlító-húzószilárdság időbeni alakulása



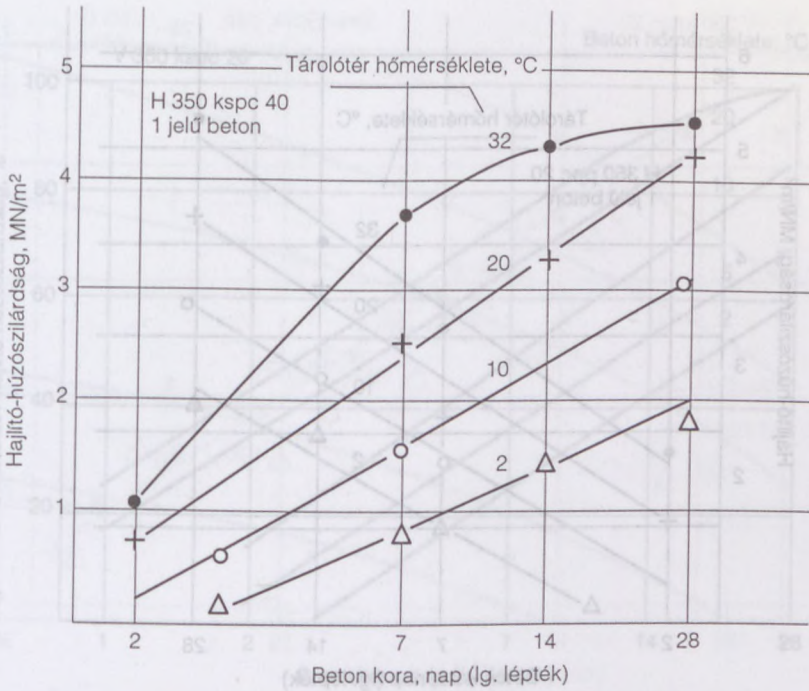
4.11. ábra. A hajlító-húzószilárdság időbeni alakulása



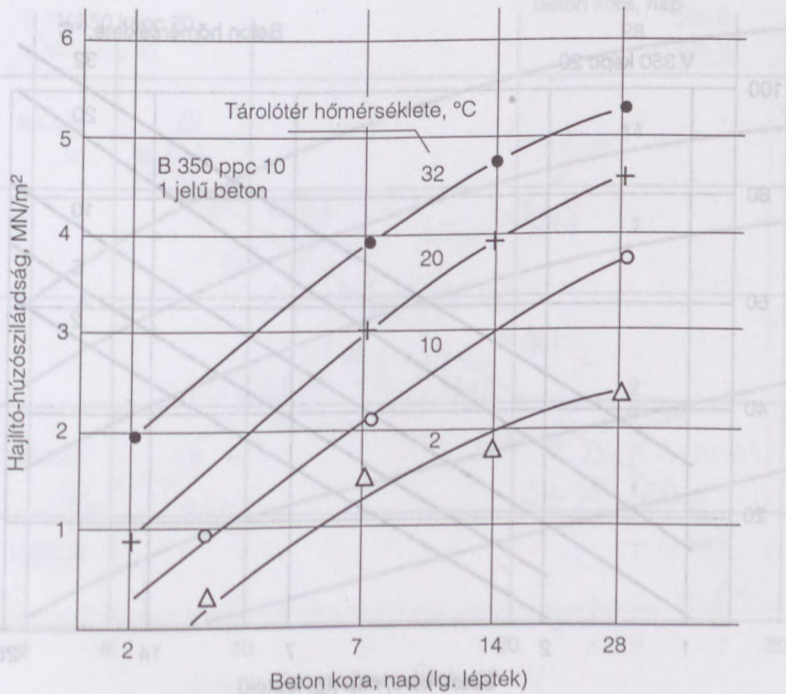
4.12. ábra. A hajlító-húzószilárdság időbeni alakulása



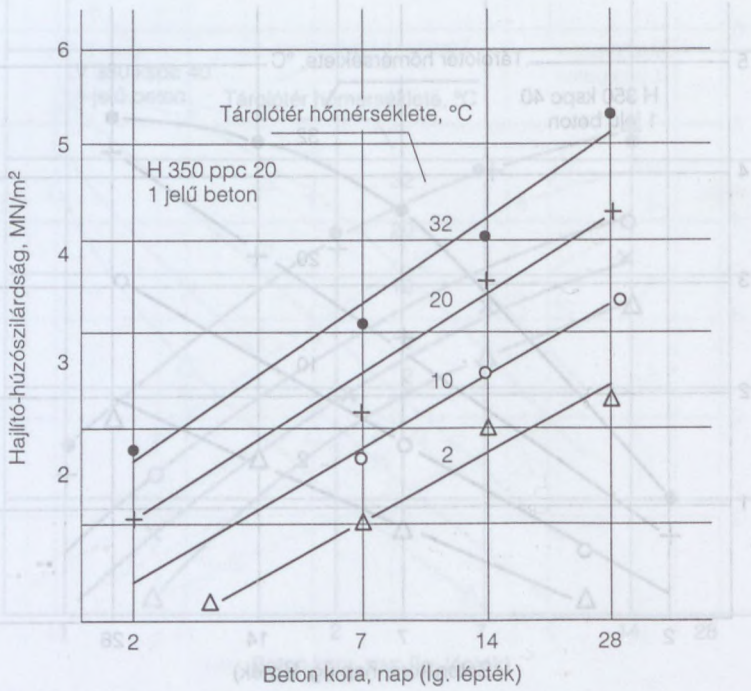
4.13. ábra. A hajlító-húzószilárdság időbeni alakulása



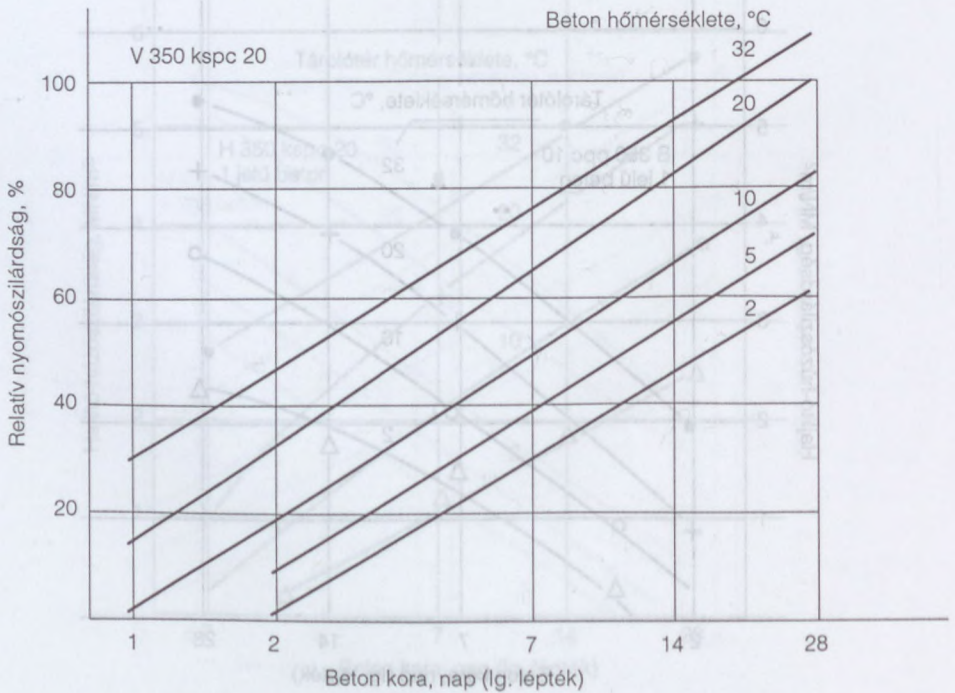
4.14. ábra. A hajlító-húzószilárdság időbeni alakulása



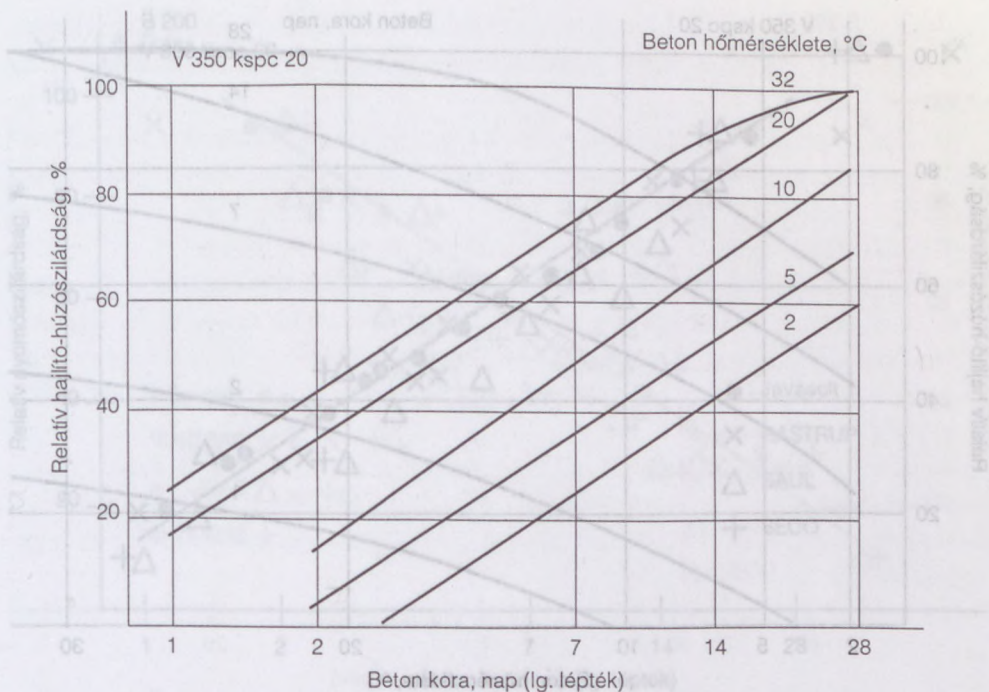
4.15. ábra. A hajlító-húzószilárdság időbeni alakulása



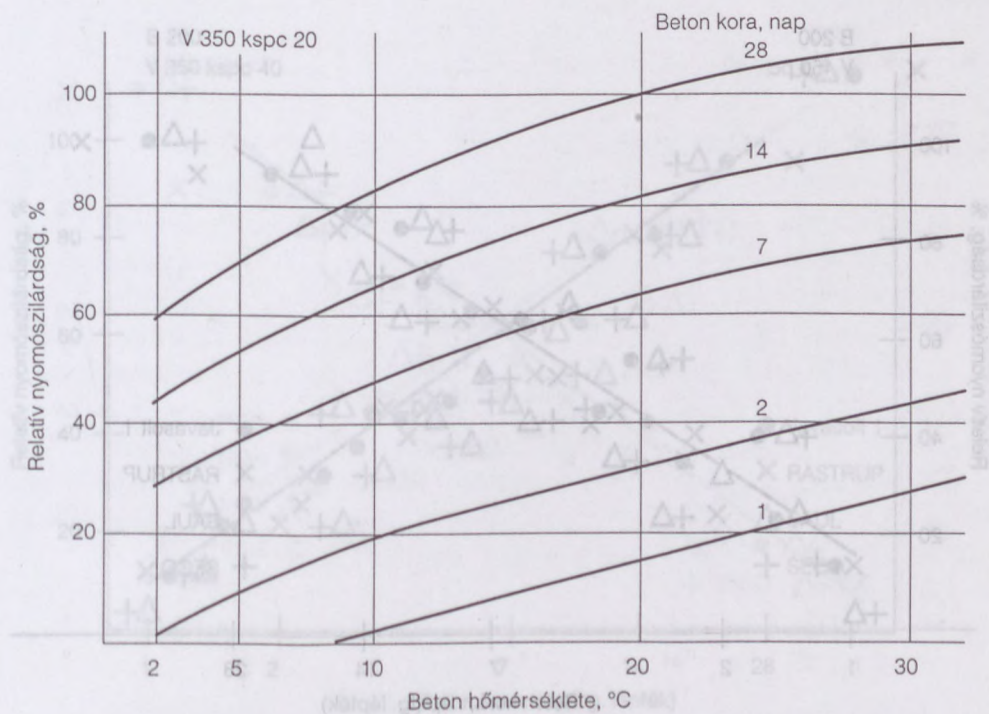
4.16. ábra. A hajlító-húzószilárdság időbeni alakulása



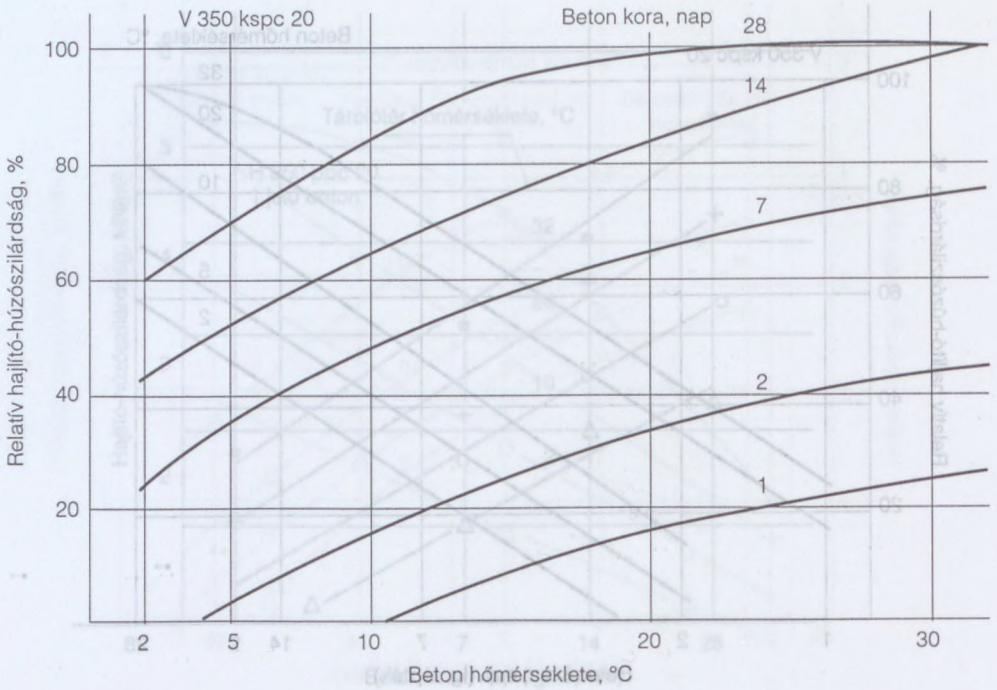
4.17. ábra. Relatív nyomószilárdságok a beton kora függvényében



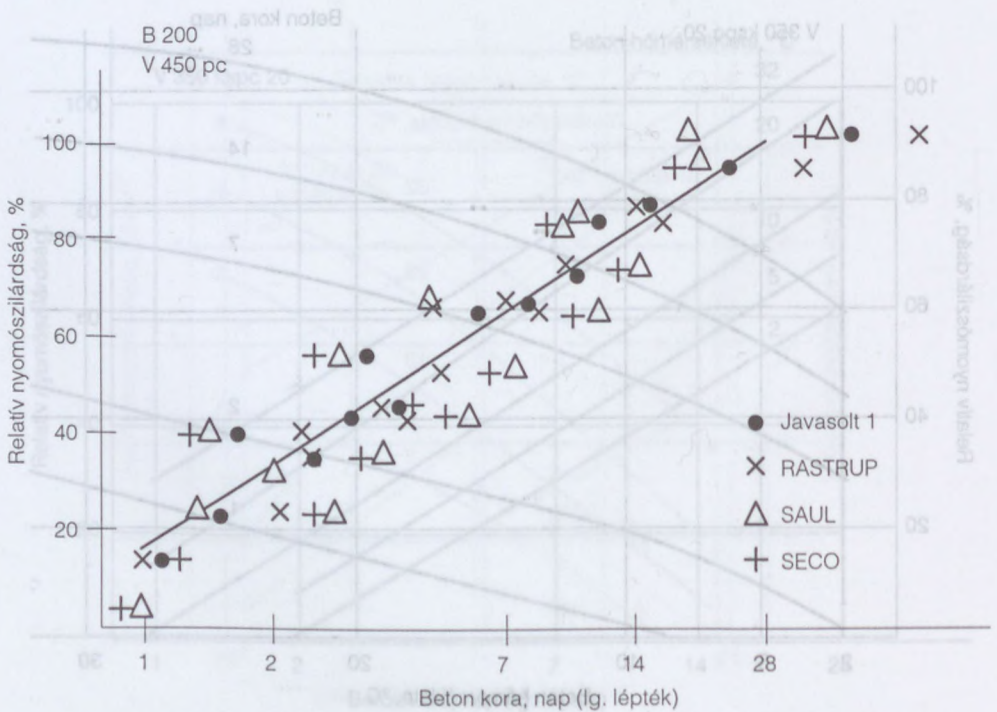
4.18. ábra. Relatív hajlító-húzószilárdságok a beton kora függvényében



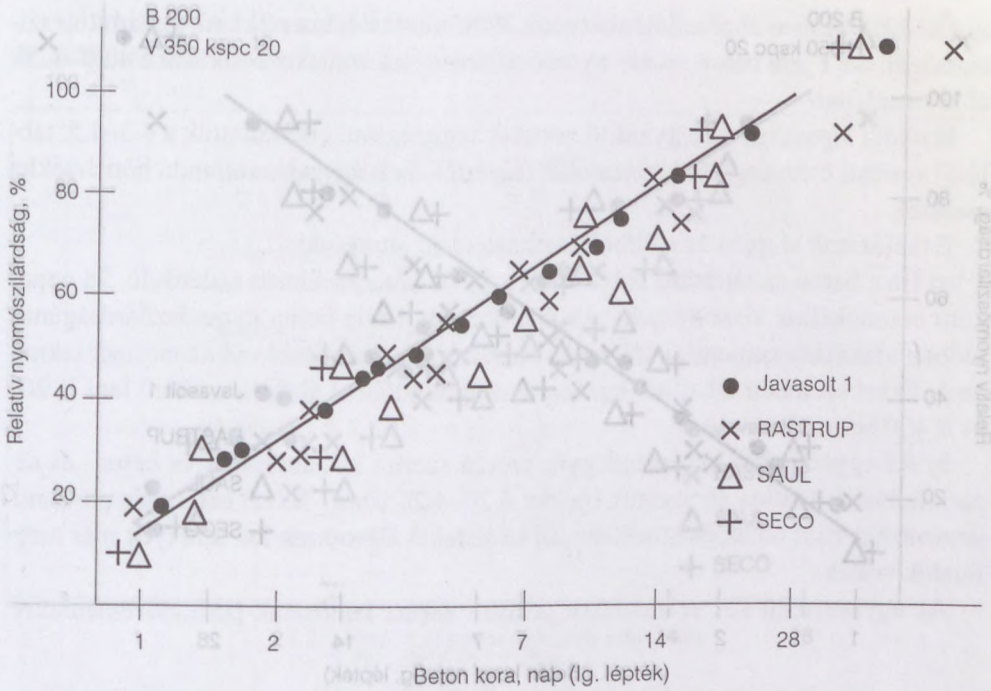
4.19a ábra. Relatív szilárdságok a hőmérséklet függvényében, nyomószilárdság



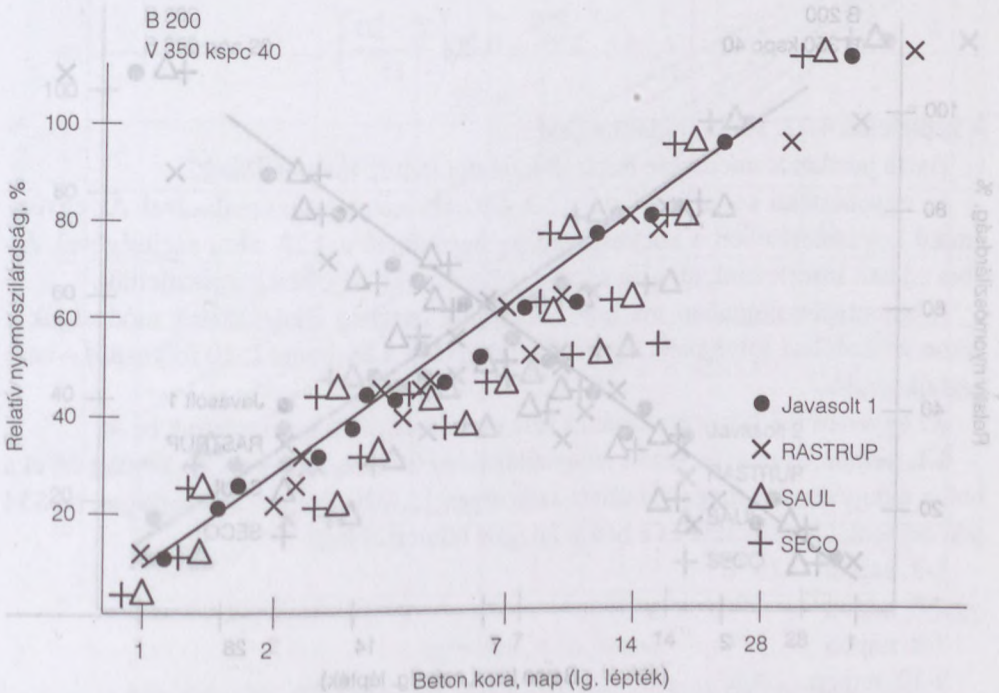
4.19b ábra. Relatív szilárdságok a hőmérséklet függvényében, hajlító-húzószilárdság



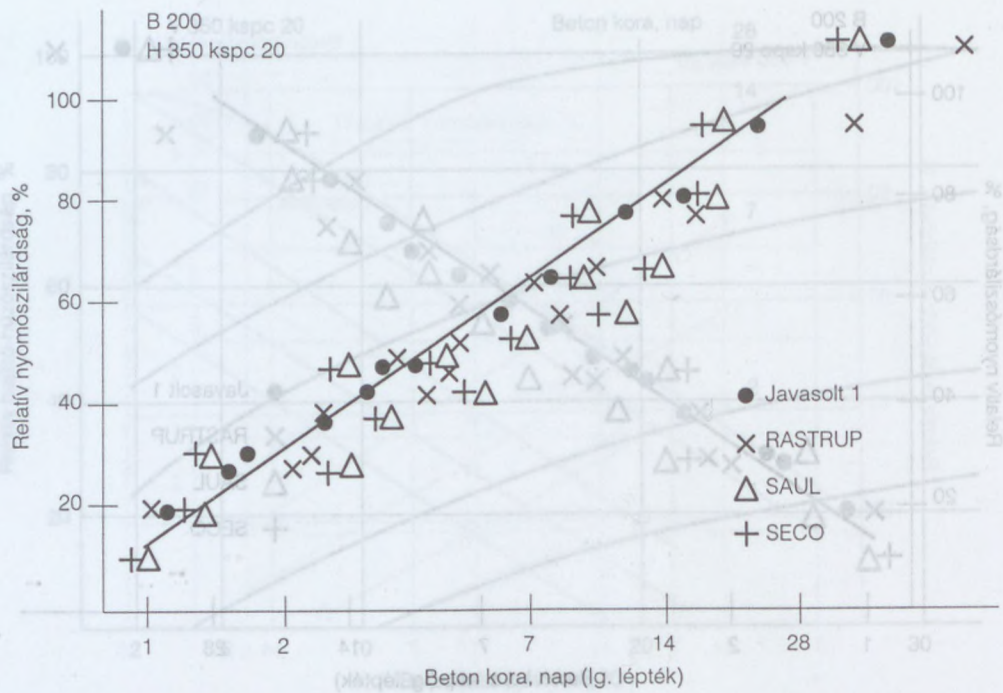
4.20. ábra. A betonok 20 °C tárolási hőmérsékletre átszámított relatív szilárdsága



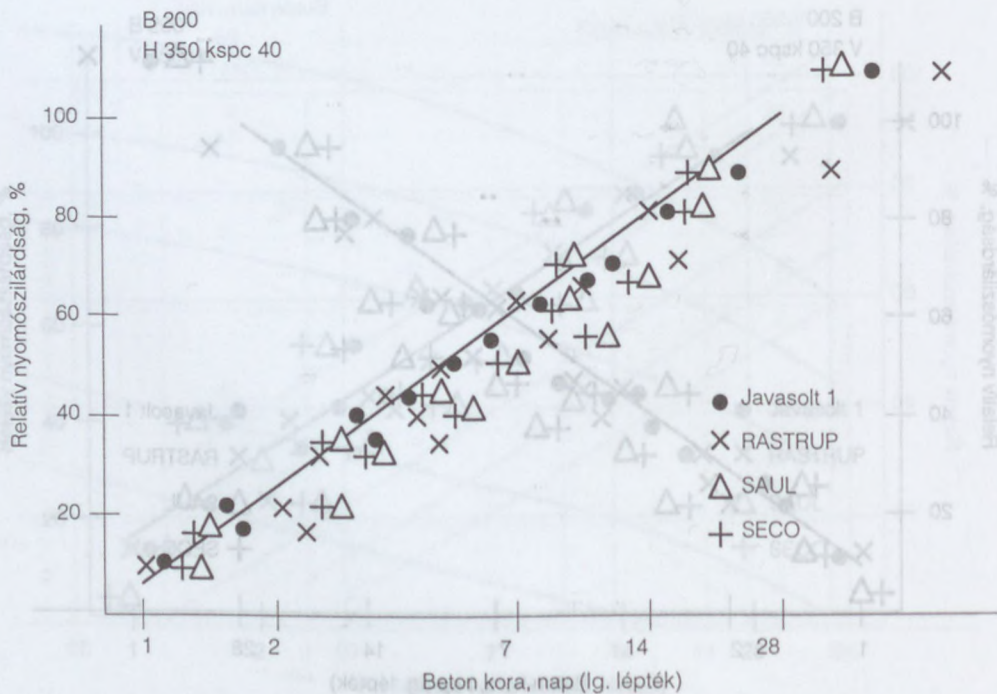
4.21. ábra. A betonok 20 °C tárolási hőmérsékletre átszámított relatív szilárdsága



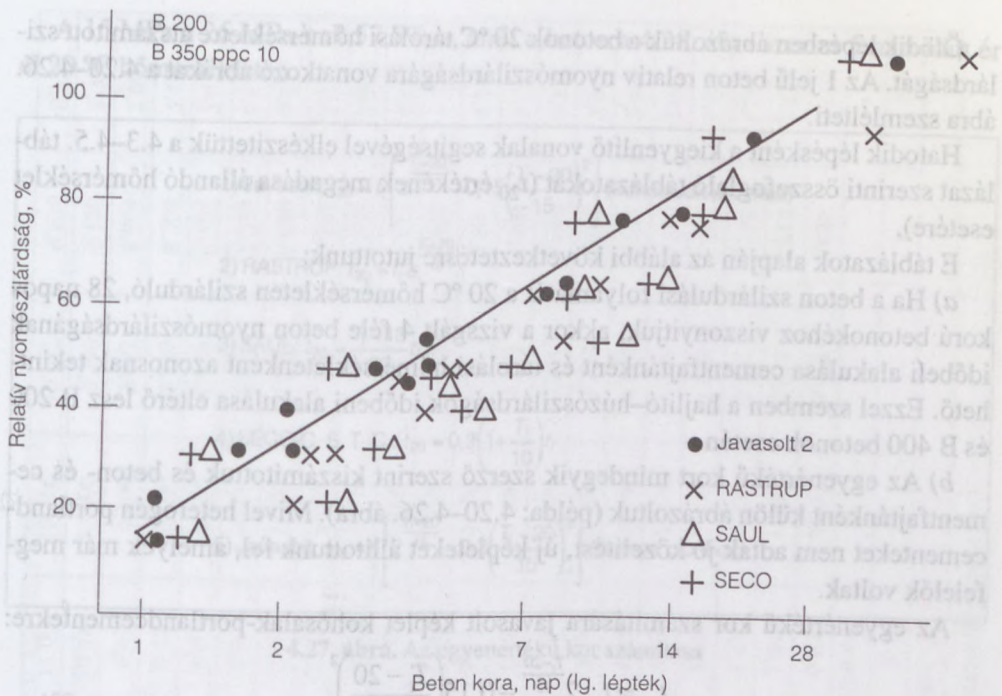
4.22. ábra. A betonok 20 °C tárolási hőmérsékletre átszámított relatív szilárdsága



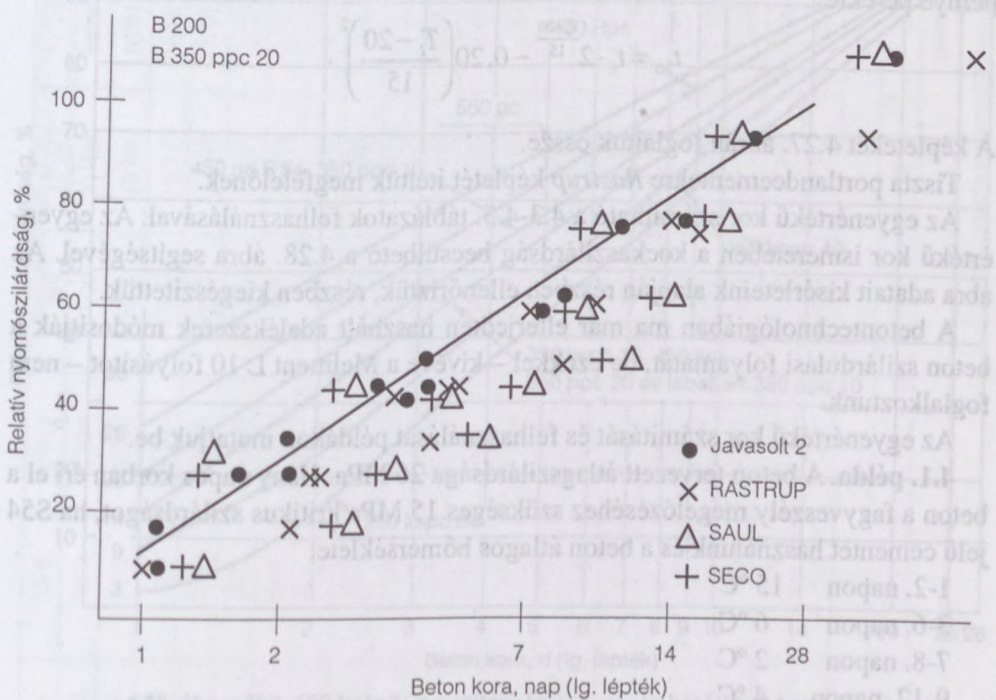
4.23. ábra. A betonok 20 °C tárolási hőmérsékletre átszámított relatív szilárdsága



4.24. ábra. A betonok 20 °C tárolási hőmérsékletre átszámított relatív szilárdsága



4.25. ábra. A betonok 20 °C tárolási hőmérsékletre átszámított relatív szilárdsága



4.26. ábra. A betonok 20 °C tárolási hőmérsékletre átszámított relatív szilárdsága

Ötödik lépésben ábrázoltuk a betonok 20 °C tárolási hőmérsékletre átszámított szilárdságát. Az 1 jelű beton relatív nyomószilárdságára vonatkozó ábrákat a 4.20–4.26. ábra szemlélteti.

Hatodik lépésként a kiegyenlítő vonalak segítségével elkészítettük a 4.3–4.5. táblázat szerinti összefoglaló táblázatokat (t_{20} értékének megadása állandó hőmérséklet esetére).

E táblázatok alapján az alábbi következtetésre jutottunk:

a) Ha a beton szilárdulási folyamatát a 20 °C hőmérsékleten szilárduló, 28 napos korú betonokéhoz viszonyítjuk, akkor a vizsgált 4 féle beton nyomószilárdságának időbeli alakulása cementfajtánként és tárolási hőmérsékletenként azonosnak tekinthető. Ezzel szemben a hajlító–húzószilárdságok időbeli alakulása eltérő lesz B 200 és B 400 betonok esetén.

b) Az egyenértékű kort mindegyik szerző szerint kiszámítottuk és beton- és cementfajtánként külön ábrázoltuk (példa: 4.20–4.26. ábra). Mivel heterogén portlandcementeket nem adtak jó közelítést, új képleteket állítottunk fel, amelyek már megfelelőek voltak.

Az egyenértékű kor számítására javasolt képlet kohósalak-portlandcementekre:

$$t_{20} = t_i \cdot 2^{\frac{T_i - 20}{15}} - 0,15 \left(\frac{T_i - 20}{15} \right)^2,$$

pernye pc-ekre

$$t_{20} = t_i \cdot 2^{\frac{T_i - 20}{15}} - 0,20 \left(\frac{T_i - 20}{15} \right)^2.$$

A képleteket 4.27. ábrán foglaltuk össze.

Tiszta portlandcementekre *Rastrup* képletét ítéltük megfelelőnek.

Az egyenértékű kor számítható a 4.3-4.5. táblázatok felhasználásával. Az egyenértékű kor ismeretében a kockaszilárdság becsülhető a 4.28. ábra segítségével. Az ábra adatait kísérleteink alapján részben ellenőriztük, részben kiegészítettük.

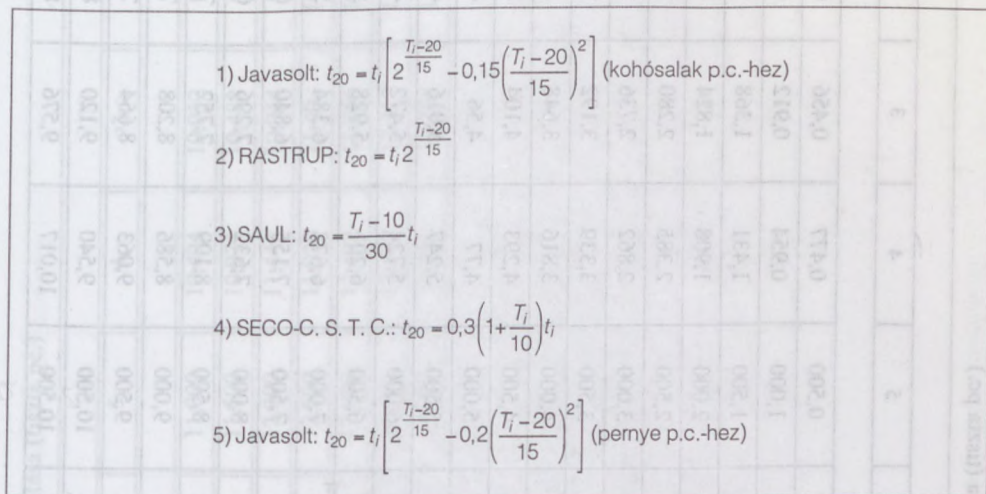
A betontechnológiában ma már elterjedten használt adalékszerek módosítják a beton szilárdulási folyamatát, de ezekkel – kivéve a Melment L 10 folyósítót – nem foglalkoztunk.

Az egyenértékű kor számítását és felhasználását példákön mutatjuk be.

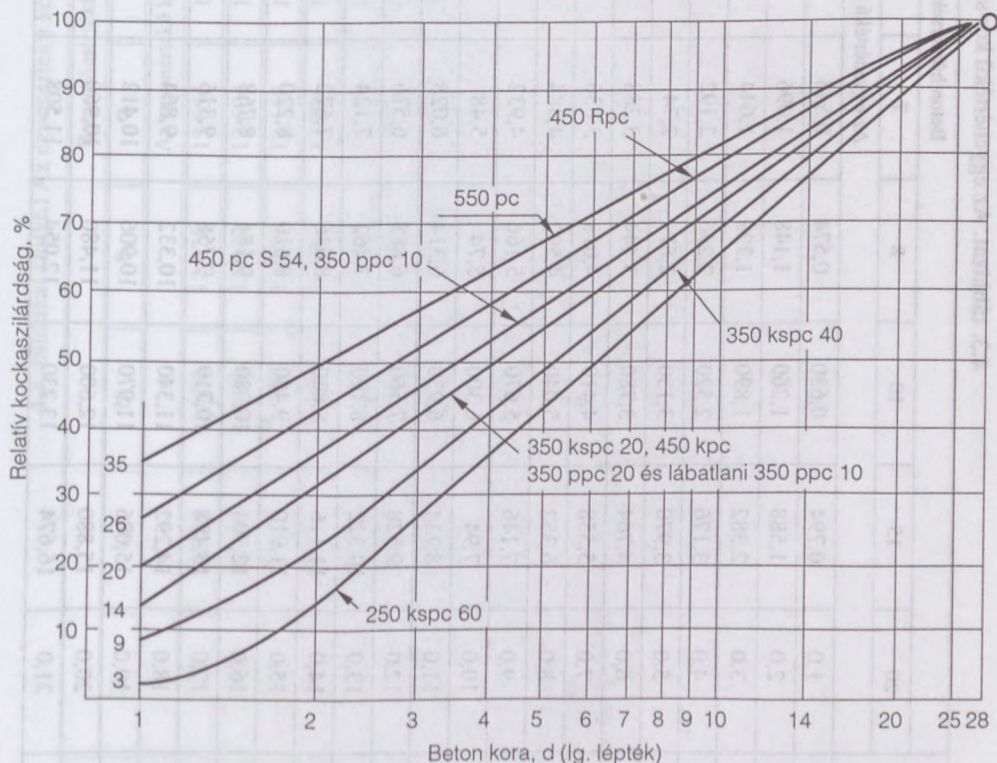
4.1. példa. A beton tervezett átlagszilárdsága 26 MPa. Hány napos korban éri el a beton a fagyveszély megelőzéséhez szükséges 15 MPa kritikus szilárdságot, ha S54 jelű cementet használunk és a beton átlagos hőmérséklete:

1-2. napon	15 °C
3-6. napon	6 °C
7-8. napon	2 °C
9-12. napon	4 °C

A 15 MPa a 26 MPa-nak 57,5%-a, amit a beton a 4.28. ábra szerint 5 nap alatt ér el 20 °C hőmérsékleten.



4.27. ábra. Az egyenértékű kor számítása



4.28. ábra. 300–400 kg/m³ cementtartalmú, gyengén képlékeny betonok relatív kockaszilárdsága 20 °C hőmérsékleten

4.3. táblázat. Az egyenértékű kor számítása (tisztá pc.)

Beton kora, nap	Beton hőmérséklete, °C									
	20	15	10	8	7	6	5	4	3	2
	Az egyenértékű kor, nap									
1	1,0	0,794	0,630	0,574	0,548	0,524	0,500	0,477	0,456	0,416
2	2,0	1,588	1,260	1,148	1,096	1,048	1,000	0,954	0,912	0,832
3	3,0	2,382	1,890	1,722	1,644	1,572	1,500	1,431	1,368	1,248
4	4,0	3,176	2,520	2,296	2,192	2,096	2,000	1,908	1,824	1,664
5	5,0	3,970	3,150	2,87	2,74	2,62	2,500	2,385	2,280	2,080
6	6,0	4,764	3,780	3,444	3,288	3,144	3,000	2,862	2,736	2,496
7	7,0	5,558	4,410	4,018	3,836	3,668	3,500	3,339	3,192	2,912
8	8,0	6,352	5,040	4,592	4,384	4,192	4,000	3,816	3,648	3,328
9	9,0	7,146	5,670	5,166	4,932	4,716	4,500	4,293	4,104	3,744
10	10,0	7,94	6,300	5,74	5,48	5,24	5,000	4,77	4,56	4,16
11	11,0	8,734	6,930	6,314	6,028	5,764	5,500	5,247	5,016	4,576
12	12,0	9,528	7,560	6,888	6,576	6,288	6,000	5,724	5,472	4,992
13	13,0	10,322	8,190	7,462	7,124	6,812	6,500	6,201	5,928	5,408
14	14,0	11,116	8,820	8,036	7,672	7,336	7,000	6,678	6,384	5,824
15	15,0	11,910	9,450	8,610	8,220	7,860	7,500	7,155	6,840	6,24
16	16,0	12,704	10,080	9,184	8,768	8,384	8,000	7,632	7,296	6,656
17	17,0	13,498	10,710	9,758	9,316	8,908	8,500	8,109	7,752	7,072
18	18,0	14,292	11,340	10,332	9,864	9,432	9,000	8,586	8,208	7,488
19	19,0	15,086	11,970	10,906	10,412	9,956	9,500	9,063	8,664	7,904
20	20,0	15,880	12,600	11,480	10,960	10,48	10,500	9,540	9,120	8,320
21	21,0	16,674	13,230	12,054	11,508	11,004	10,500	10,017	9,576	8,736

4.3. táblázat (folyt.) Az egyenértékű kor számítása (tisztá pc.)

31	31'00	10'35,4	12'24	14'53	18'00	22,0	23,0	24,0	25,0	26,0	27,0	28,0	223	4'00
Beton kora, nap	Beton hőmérséklete, °C													
	20	15	10	8	7,8	6	5	4	3	2	1	0	230	4'30
	Az egyenértékű kor, nap													
22	22,0	17,468	13,860	12,628	12,056	11,528	11,000	10,494	10,032	9,568	9,152	8,784	8,424	8,100
23	23,0	18,262	14,490	13,202	12,604	12,052	11,500	10,971	10,488	9,984	9,528	9,112	8,736	8,400
24	24,0	19,056	15,120	13,776	13,152	12,576	12,000	11,448	10,944	10,480	10,064	9,688	9,352	9,060
25	25,0	19,85	15,750	14,350	13,70	13,10	12,500	11,925	11,40	10,900	10,440	10,020	9,640	9,300
26	26,0	20,644	16,380	14,924	14,248	13,624	13,000	12,402	11,856	11,352	10,880	10,440	10,040	9,680
27	27,0	21,438	17,010	15,498	14,796	14,148	13,500	12,879	12,312	11,800	11,320	10,880	10,480	10,120
28	28,0	22,232	17,640	16,072	15,344	14,672	14,000	13,356	12,768	12,240	11,760	11,320	10,920	10,560
10	t_{1-20}	1'33	2'02	2'32	2'58	3'02	3'20	3'30	3'39	3'48	3'56	4'00	4'08	4'16
	$t_{20} = t_1 \cdot 2^{15}$	3'00	4'00	5'00	6'00	7'00	8'00	9'00	10'00	11'00	12'00	13'00	14'00	15'00
	t_{20} egyenértékű kör,													
	t_i a beton kora,													
	T_i a beton hőmérséklete, °C													
		2'00	3'00	4'00	5'00	6'00	7'00	8'00	9'00	10'00	11'00	12'00	13'00	14'00
		4'00	5'11	6'22	7'32	8'41	9'50	11'00	12'09	13'18	14'27	15'36	16'45	17'54
		6'00	7'33	9'06	10'39	12'12	13'45	15'18	16'51	18'24	19'57	21'30	23'03	24'36
		8'00	10'00	12'33	15'06	17'39	20'12	22'45	25'18	27'51	30'24	32'57	35'30	38'03
		10'00	13'00	16'33	20'06	23'39	27'12	30'45	34'18	37'51	41'24	44'57	48'30	52'03
		12'00	16'00	20'33	25'06	29'39	34'12	38'45	43'18	47'51	52'24	56'57	61'30	66'03
		14'00	19'00	24'33	29'06	34'39	39'12	43'45	48'18	52'51	57'24	61'57	66'30	71'03
		16'00	22'00	28'33	33'06	38'39	43'12	47'45	52'18	56'51	61'24	65'57	70'30	75'03
		18'00	25'00	31'33	36'06	41'39	46'12	50'45	55'18	59'51	64'24	68'57	73'30	78'03
		20'00	28'00	34'33	39'06	44'39	49'12	53'45	58'18	62'51	67'24	71'57	76'30	81'03
		22'00	31'00	37'33	42'06	47'39	52'12	56'45	61'18	65'51	70'24	74'57	79'30	84'03
		24'00	34'00	40'33	45'06	50'39	55'12	59'45	64'18	68'51	73'24	77'57	82'30	87'03
		26'00	37'00	43'33	48'06	53'39	58'12	62'45	67'18	71'51	76'24	80'57	85'30	90'03
		28'00	40'00	46'33	51'06	56'39	61'12	65'45	70'18	74'51	79'24	83'57	88'30	93'03
		30'00	43'00	49'33	54'06	59'39	64'12	68'45	73'18	77'51	82'24	86'57	91'30	96'03
		32'00	46'00	52'33	57'06	62'39	67'12	71'45	76'18	80'51	85'24	89'57	94'30	99'03
		34'00	49'00	55'33	60'06	65'39	70'12	74'45	79'18	83'51	88'24	92'57	97'30	102'03
		36'00	52'00	58'33	63'06	68'39	73'12	77'45	82'18	86'51	91'24	95'57	100'30	105'03
		38'00	55'00	61'33	66'06	71'39	76'12	80'45	85'18	89'51	94'24	98'57	103'30	108'03
		40'00	58'00	64'33	69'06	74'39	79'12	83'45	88'18	92'51	97'24	101'57	106'30	111'03
		42'00	61'00	67'33	72'06	77'39	82'12	86'45	91'18	95'51	100'24	104'57	109'30	114'03
		44'00	64'00	70'33	75'06	80'39	85'12	89'45	94'18	98'51	103'24	107'57	112'30	117'03
		46'00	67'00	73'33	78'06	83'39	88'12	92'45	97'18	101'51	106'24	110'57	115'30	120'03
		48'00	70'00	76'33	81'06	86'39	91'12	95'45	100'18	104'51	109'24	113'57	118'30	123'03
		50'00	73'00	79'33	84'06	89'39	94'12	98'45	103'18	107'51	112'24	116'57	121'30	126'03
		52'00	76'00	82'33	87'06	92'39	97'12	101'45	106'18	110'51	115'24	119'57	124'30	129'03
		54'00	79'00	85'33	90'06	95'39	100'12	104'45	109'18	113'51	118'24	122'57	127'30	132'03
		56'00	82'00	88'33	93'06	98'39	103'12	107'45	112'18	116'51	121'24	125'57	130'30	135'03
		58'00	85'00	91'33	96'06	101'39	106'12	110'45	115'18	119'51	124'24	128'57	133'30	138'03
		60'00	88'00	94'33	99'06	104'39	109'12	113'45	118'18	122'51	127'24	131'57	136'30	141'03
		62'00	91'00	97'33	102'06	107'39	112'12	116'45	121'18	125'51	130'24	134'57	139'30	144'03
		64'00	94'00	100'33	105'06	110'39	115'12	119'45	124'18	128'51	133'24	137'57	142'30	148'03
		66'00	97'00	103'33	108'06	113'39	118'12	122'45	127'18	131'51	136'24	140'57	145'30	151'03
		68'00	100'00	106'33	111'06	116'39	121'12	125'45	130'18	134'51	139'24	143'57	148'30	154'03
		70'00	103'00	109'33	114'06	119'39	124'12	128'45	133'18	137'51	142'24	146'57	151'30	157'03
		72'00	106'00	112'33	117'06	122'39	127'12	131'45	136'18	140'51	145'24	149'57	154'30	160'03
		74'00	109'00	115'33	120'06	125'39	130'12	134'45	139'18	143'51	148'24	152'57	157'30	163'03
		76'00	112'00	118'33	123'06	128'39	133'12	137'45	142'18	146'51	151'24	155'57	160'30	166'03
		78'00	115'00	121'33	126'06	131'39	136'12	140'45	145'18	149'51	154'24	158'57	163'30	169'03
		80'00	118'00	124'33	129'06	134'39	139'12	143'45	148'18	152'51	157'24	161'57	166'30	172'03
		82'00	121'00	127'33	132'06	137'39	142'12	146'45	151'18	155'51	160'24	164'57	169'30	175'03
		84'00	124'00	130'33	135'06	140'39	145'12	149'45	154'18	158'51	163'24	167'57	172'30	178'03
		86'00	127'00	133'33	138'06	143'39	148'12	152'45	157'18	161'51	166'24	170'57	175'30	181'03
		88'00	130'00	136'33	141'06	146'39	151'12	155'45	160'18	164'51	169'24	173'57	178'30	184'03
		90'00	133'00	139'33	144'06	149'39	154'12	158'45	163'18	167'51	172'24	176'57	181'30	187'03
		92'00	136'00	142'33	147'06	152'39	157'12	161'45	166'18	170'51	175'24	179'57	184'30	190'03
		94'00	139'00	145'33	150'06	155'39	160'12	164'45	169'18	173'51	178'24	182'57	187'30	193'03
		96'00	142'00	148'33	153'06	158'39	163'12	167'45	172'18	176'51	181'24	185'57	190'30	196'03
		98'00	145'00	151'33	156'06	161'39	166'12	170'45	175'18	179'51	184'24	188'57	193'30	199'03
		100'00	148'00	154'33	159'06	164'39	169'12	173'45	178'18	182'51	187'24	191'57	196'30	202'03
		102'00	151'00	157'33	162'06	167'39	172'12	176'45	181'18	185'51	190'24	194'57	199'30	205'03
		104'00	154'00	160'33	165'06	170'39	175'12	179'45	184'18	188'51	193'24	197'57	202'30	208'03
		106'00	157'00	163'33	168'06	173'39	178'12	182'45	187'18	191'51	196'24	200'57	205'30	211'03
		108'00	160'00	166'33	171'06	176'39	181'12	185'45	190'18	194'51	199'24	203'57	208'30	214'03
		110'00	163'00	169'33	174'06	179'39	184'12	188'45	193'18	197'51	202'24	206'57	211'30	217'03
		112'00	166'00	172'33	177'06	182'39	187'12	191'45	196'18	200'51	205'24	209'57	214'30	220'03
		114'00	169'00	175'33	180'06	185'39	190'12	194'45	199'18	203'51	208'24	212'57	217'30	223'03
		116'00	172'00	178'33	183'06	188'39	193'12	197'45	202'18	206'51	211'24	215'57	220'30	226'03
		118'00	175'00	181'33	186'06	191'39	196'12	200'45	205'18	209'51	214'24	218'57	223'30	229'03
		120'00	178'00	184'33	189'06	194'39	199'12	203'45	208'18	212'51	217'24	221'57	226'30	232'03
		122'00	181'00											

4.4. táblázat. Az egyenértékű kor számítása (kohósalak-portlandcementhez)

Beton kora, nap	Beton hőmérséklete, °C									
	20	15	10	8	7	6	5	4	3	2
	Az egyenértékű kor, nap									
1	1,00	0,78	0,56	0,484	0,44	0,39	0,35	0,31	0,26	0,22
2	2,00	1,55	1,13	0,96	0,87	0,79	0,70	0,61	0,53	0,44
3	3,00	2,33	1,69	1,44	1,31	1,18	1,05	0,92	0,79	0,66
4	4,00	3,11	2,25	1,91	1,74	1,57	1,40	1,23	1,05	0,88
5	5,00	3,89	2,82	2,39	2,18	1,96	1,75	1,53	1,32	1,10
6	6,00	4,66	3,38	2,87	2,61	2,36	2,10	1,84	1,58	1,32
7	7,00	5,44	3,94	3,35	3,05	2,75	2,45	2,15	1,84	1,53
8	8,00	6,22	4,51	3,83	3,49	3,14	2,80	2,45	2,11	1,75
9	9,00	6,99	5,07	4,31	3,92	3,54	3,15	2,76	2,37	1,97
10	10,00	7,77	5,63	4,78	4,36	3,93	3,50	3,07	2,63	2,19
11	11,00	8,55	6,20	5,26	4,79	4,32	3,85	3,37	2,90	2,41
12	12,00	9,32	6,76	5,74	5,23	4,72	4,20	3,68	3,16	2,63
13	13,00	10,10	7,32	6,22	5,66	5,11	4,55	3,99	3,42	2,85
14	14,00	10,88	7,89	6,70	6,10	5,50	4,90	4,29	3,68	3,07
15	15,00	11,66	8,45	7,18	6,54	5,89	5,25	4,60	3,95	3,29
16	16,00	12,43	9,01	7,65	6,97	6,29	5,60	4,91	4,21	3,51
17	17,00	13,21	9,58	8,13	7,41	6,68	5,95	5,21	4,47	3,73
18	18,00	13,99	10,14	8,61	7,84	7,07	6,30	5,52	4,74	3,95
19	19,00	14,74	10,70	9,09	8,28	7,47	6,65	5,83	5,00	4,17
20	20,00	15,54	11,27	9,57	8,71	7,86	7,00	6,14	5,26	4,39
21	21,00	16,32	11,83	10,05	9,15	8,25	7,35	6,44	5,53	4,60

4.4. táblázat (folyt.) Az egyenértékű kor számítása (kohósalak-portlandcementhez)

31	51,00	10,75	10,85	8,03	8,03	7,97	6,45	5	2,00	4,18	3,00
Beton kora, nap	50,00	12,43	10,85	8,03	8,03	7,97	6,45	5	2,00	2,68	3,04
120	18,00	17,15	11,10	8,48	8,48	8,42	6,45	4	4,24	3,88	2
18,00	17,60	11,10	8,48	8,03	8,03	7,97	6,45	5	4,20	3,28	3,02
22,00	17,09	12,39	10,52	9,59	9,59	9,59	8,65	7,70	6,75	5,79	4,82
23,00	17,87	12,96	11,00	10,02	10,02	10,02	9,04	8,05	7,06	6,05	5,04
24,00	18,65	13,52	11,48	10,46	10,46	10,46	9,43	8,40	7,36	6,32	5,26
25,00	19,43	14,08	11,96	10,89	10,89	10,89	9,82	8,75	7,67	6,58	5,48
26,00	20,20	14,65	12,44	11,33	11,33	11,33	10,22	9,10	7,98	6,84	5,70
27,00	20,98	15,21	12,92	11,77	11,77	11,77	10,61	9,45	8,28	7,11	5,92
28,00	21,76	15,77	13,39	12,20	12,20	12,20	11,00	9,80	8,59	7,37	6,14
10	10,00	2,41	4,40	3,68	3,68	3,68	3,48	3,00	3,20	1,88	1,43
20	20,00	4,82	8,81	7,36	7,36	7,36	7,14	6,30	6,52	3,58	2,85
30	30,00	7,23	13,22	10,94	10,94	10,94	10,72	9,40	9,60	5,88	4,72
40	40,00	9,64	18,03	14,56	14,56	14,56	14,34	12,40	12,60	7,98	6,42
50	50,00	12,05	23,24	19,18	19,18	19,18	18,96	16,40	16,60	10,38	8,42
60	60,00	14,46	28,85	24,00	24,00	24,00	23,78	20,40	20,60	12,78	10,42
70	70,00	16,87	34,86	29,12	29,12	29,12	28,90	24,40	24,60	15,18	12,42
80	80,00	19,28	41,27	34,64	34,64	34,64	34,42	28,40	28,60	17,58	14,42
90	90,00	21,69	48,08	40,56	40,56	40,56	40,34	32,40	32,60	20,00	16,42
100	100,00	24,10	55,29	46,88	46,88	46,88	46,66	36,40	36,60	22,40	18,42
110	110,00	26,51	62,90	53,60	53,60	53,60	53,38	40,40	40,60	24,80	20,42
120	120,00	28,92	70,91	60,72	60,72	60,72	60,50	44,40	44,60	27,20	22,42
130	130,00	31,33	79,32	68,24	68,24	68,24	68,02	48,40	48,60	29,60	24,42
140	140,00	33,74	88,13	76,16	76,16	76,16	75,94	52,40	52,60	32,00	26,42
150	150,00	36,15	97,34	84,48	84,48	84,48	84,26	56,40	56,60	34,40	28,42
160	160,00	38,56	106,95	93,20	93,20	93,20	92,98	60,40	60,60	36,80	30,42
170	170,00	40,97	116,96	102,32	102,32	102,32	102,10	64,40	64,60	39,20	32,42
180	180,00	43,38	127,37	111,84	111,84	111,84	111,62	68,40	68,60	41,60	34,42
190	190,00	45,79	138,18	121,76	121,76	121,76	121,54	72,40	72,60	44,00	36,42
200	200,00	48,20	149,39	132,08	132,08	132,08	131,86	76,40	76,60	46,40	38,42
210	210,00	50,61	161,00	142,80	142,80	142,80	142,58	80,40	80,60	48,80	40,42
220	220,00	53,02	172,91	153,92	153,92	153,92	153,70	84,40	84,60	51,20	42,42
230	230,00	55,43	185,12	165,44	165,44	165,44	165,22	88,40	88,60	53,60	44,42
240	240,00	57,84	197,73	177,36	177,36	177,36	177,14	92,40	92,60	56,00	46,42
250	250,00	60,25	210,74	189,68	189,68	189,68	189,46	96,40	96,60	58,40	48,42
260	260,00	62,66	224,15	202,40	202,40	202,40	202,18	100,40	100,60	60,80	50,42
270	270,00	65,07	237,96	215,52	215,52	215,52	215,30	104,40	104,60	63,20	52,42
280	280,00	67,48	252,17	229,04	229,04	229,04	228,82	108,40	108,60	65,60	54,42
290	290,00	69,89	266,78	242,96	242,96	242,96	242,74	112,40	112,60	68,00	56,42
300	300,00	72,30	281,79	257,28	257,28	257,28	257,06	116,40	116,60	70,40	58,42
310	310,00	74,71	297,20	272,00	272,00	272,00	271,78	120,40	120,60	72,80	60,42
320	320,00	77,12	312,91	287,12	287,12	287,12	286,90	124,40	124,60	75,20	62,42
330	330,00	79,53	328,92	302,64	302,64	302,64	302,42	128,40	128,60	77,60	64,42
340	340,00	81,94	345,23	318,56	318,56	318,56	318,34	132,40	132,60	80,00	66,42
350	350,00	84,35	361,94	334,88	334,88	334,88	334,66	136,40	136,60	82,40	68,42
360	360,00	86,76	379,05	351,60	351,60	351,60	351,38	140,40	140,60	84,80	70,42
370	370,00	89,17	396,56	368,72	368,72	368,72	368,50	144,40	144,60	87,20	72,42
380	380,00	91,58	414,47	386,24	386,24	386,24	386,02	148,40	148,60	89,60	74,42
390	390,00	93,99	432,78	404,16	404,16	404,16	403,94	152,40	152,60	92,00	76,42
400	400,00	96,40	451,49	422,48	422,48	422,48	422,26	156,40	156,60	94,40	78,42
410	410,00	98,81	470,60	441,20	441,20	441,20	440,98	160,40	160,60	96,80	80,42
420	420,00	101,22	490,11	460,32	460,32	460,32	460,10	164,40	164,60	99,20	82,42
430	430,00	103,63	510,02	480,04	480,04	480,04	479,82	168,40	168,60	101,60	84,42
440	440,00	106,04	530,33	500,36	500,36	500,36	500,14	172,40	172,60	104,00	86,42
450	450,00	108,45	551,04	521,28	521,28	521,28	521,06	176,40	176,60	106,40	88,42
460	460,00	110,86	572,15	542,80	542,80	542,80	542,58	180,40	180,60	108,80	90,42
470	470,00	113,27	593,66	564,92	564,92	564,92	564,70	184,40	184,60	111,20	92,42
480	480,00	115,68	615,57	587,64	587,64	587,64	587,42	188,40	188,60	113,60	94,42
490	490,00	118,09	637,88	611,06	611,06	611,06	610,84	192,40	192,60	116,00	96,42
500	500,00	120,50	660,59	635,28	635,28	635,28	635,06	196,40	196,60	118,40	98,42
510	510,00	122,91	683,70	660,40	660,40	660,40	660,18	200,40	200,60	120,80	100,42
520	520,00	125,32	707,21	686,32	686,32	686,32	686,00	204,40	204,60	123,20	102,42
530	530,00	127,73	732,02	713,04	713,04	713,04	712,72	208,40	208,60	125,60	104,42
540	540,00	130,14	757,13	740,56	740,56	740,56	740,24	212,40	212,60	128,00	106,42
550	550,00	132,55	782,64	768,88	768,88	768,88	768,56	216,40	216,60	130,40	108,42
560	560,00	134,96	808,55	798,00	798,00	798,00	797,68	220,40	220,60	132,80	110,42
570	570,00	137,37	834,86	827,92	827,92	827,92	827,60	224,40	224,60	135,20	112,42
580	580,00	139,78	861,57	858,64	858,64	858,64	858,32	228,40	228,60	137,60	114,42
590	590,00	142,19	888,68	890,16	890,16	890,16	889,84	232,40	232,60	140,00	116,42
600	600,00	144,60	916,19	922,48	922,48	922,48	922,16	236,40	236,60	142,40	118,42
610	610,00	147,01	944,10	955,60	955,60	955,60	955,28	240,40	240,60	144,80	120,42
620	620,00	149,42	972,41	989,52	989,52	989,52	989,16	244,40	244,60	147,20	122,42
630	630,00	151,83	1001,12	1024,24	1024,24	1024,24	1023,80	248,40	248,60	149,60	124,42
640	640,00	154,24	1030,23	1060,06	1060,06	1060,06	1059,60	252,40	252,60	152,00	126,42
650	650,00	156,65	1060,74	1097,08	1097,08	1097,08	1096,64	256,40	256,60	154,40	128,42
660	660,00	159,06	1092,65	1135,40	1135,40	1135,40	1134,96	260,40	260,60	156,80	130,42
670	670,00	161,47	1125,96	1175,02	1175,02	1175,02	1174,56	264,40	264,60	159,20	132,42
680	680,00	163,88	1160,77	1215,94	1215,94	1215,94	1215,48	268,40	268,60	161,60	134,42
690	690,00	166,29	1197,08	1258,26	1258,26	1258,26	1257,80	272,40	272,60	164,00	136,42
700	700,00	168,70	1234,89	1302,08	1302,08	1302,08	1301,64	276,40	276,60	166,40	138,42
710	710,00	171,11	1274,20	1347,40	1347,40	1347,40	1346,96	280,40	280,60	168,80	140,42
720	720,00	173,52	1315,01	1394,22	1394,22	1394,22	1393,76	284,40	284,60	171,20	142,42
730	730,00	175,93	1357,32	1442,64	1442,64	1442,64	1442,20	288,40	288,60	173,60	144,42
740	740,00	178,34	1401,13	1492,76	1492,76	1492,76	1492,32	292,40	292,60	176,00	146,42
750	750,00	180,75	1446,44	1544,58	1544,58	1544,58	1544,16	296,40	296,60	178,40	

4.5. táblázat. Az egyenértékű kor számítása (pernye-portlandcementhez)

Beton kora, nap	Beton hőmérséklete, °C										
	20	15	10	8	7	6	5	4	3	2	
	Az egyenértékű kor, nap										
1	1,00	0,77	0,54	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	
2	2,00	1,54	1,08	0,89	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,29	
3	3,00	2,31	1,62	1,34	1,19	1,05	0,90	0,75	0,60	0,44	
4	4,00	3,08	2,16	1,78	1,59	1,40	1,20	1,00	0,80	0,59	
5	5,00	3,86	2,70	2,23	1,99	1,75	1,50	1,25	0,99	0,74	
6	6,00	4,63	3,63	2,68	2,39	2,10	1,80	1,50	1,19	0,88	
7	7,00	5,40	3,79	3,12	2,79	2,44	2,10	1,75	1,39	1,03	
8	8,00	6,17	4,33	3,57	3,18	2,80	2,40	2,00	1,59	1,18	
9	9,00	6,94	4,87	4,02	3,58	3,14	2,70	2,25	1,79	1,32	
10	10,00	7,71	5,41	4,46	3,98	3,49	3,00	2,50	1,99	1,47	
11	11,00	8,40	5,95	4,91	4,38	3,84	3,30	2,75	2,19	1,62	
12	12,00	9,26	6,49	5,36	4,78	4,19	3,60	3,00	2,39	1,77	
13	13,00	10,03	7,03	5,80	5,18	4,54	3,90	3,25	2,59	1,91	
14	14,00	10,80	7,58	6,25	5,57	4,89	4,20	3,50	2,79	2,06	
15	15,00	11,57	8,12	6,70	5,97	5,24	4,50	3,75	2,98	2,21	
16	16,00	12,34	8,66	7,14	6,37	5,59	4,80	4,00	3,18	2,36	
17	17,00	13,12	9,20	7,59	6,77	5,94	5,10	4,25	3,38	2,50	
18	18,00	13,89	9,74	8,03	7,17	6,29	5,40	4,50	3,58	2,65	
19	19,00	14,66	10,28	8,48	7,56	6,64	5,70	4,75	3,78	2,80	
20	20,00	15,43	10,82	8,93	7,96	6,99	6,00	5,00	3,98	2,94	
21	21,00	16,20	11,36	9,37	8,36	7,34	6,30	5,25	4,18	3,09	

4.5. táblázat (folyt.) Az egyenértékű kor számítása (pelye-portlandcementhez)

Beton kora, nap	Beton hőmérséklete, °C									
	20	15	10	8	7	6	5	4	3	2
22	22,00	16,97	11,90	9,82	8,76	7,69	6,60	5,50	4,38	3,24
23	23,00	17,74	12,44	10,27	9,16	8,04	6,90	5,75	4,58	3,39
24	24,00	18,52	12,98	10,71	9,56	8,39	7,20	6,00	4,78	3,53
25	25,00	19,29	13,53	11,16	9,95	8,74	7,50	6,25	4,97	3,68
26	26,00	20,06	14,07	11,60	10,36	9,08	7,80	6,50	5,17	3,83
27	27,00	20,83	14,61	12,05	10,75	9,43	8,10	6,75	5,37	3,98
28	28,00	21,60	15,15	12,50	11,15	9,78	8,40	7,00	5,57	4,12

$$t_{20} = t_i \cdot 2^{15} \cdot 2^{T_i - 20} - 0,2 \left(\frac{T_i - 20}{15} \right)^2$$

t_{20} egyenértékű kor,

t_i a beton kora,

T_i a beton hőmérséklete, °C

A 4.3. táblázat szerint az egyenértékű kor a következőképpen számítható:

Időtartam, nap	A beton hőmérséklete, °C	Egyenértékű kor, nap
2	15	1,588
4	6	2,096
2	2	0,832
1	4	0,477
9		4,993 \approx 5 nap

Tehát a kritikus szilárdságot 9 nap múlva éri el.

4.2. példa. A beton tervezett átlagszilárdsága 40 MPa. A feszítés ráengedéséhez előírt szilárdság 28 MPa. A cement 450 Rpc. A 28 MPa a tervezett átlagszilárdság 70%-a. A 4.28. ábra szerint ezt a szilárdságot a beton 6,6 nap alatt éri el, ha hőmérséklete 20 °C. A kérdés az, hogy 20 °C-nál kisebb hőmérsékleten hány nap múlva engedhető rá a feszültség.

A bedolgozott beton hőmérséklete 6 °C. A beton hőmérsékletét 3 db termoelemmel mértük. Ezeket úgy helyeztük el, hogy egy-egy a zsalu mellett, egy pedig a tengelyvonalában volt (jó közelítéssel azonos keresztmetszetben). Az átlagos hőmérsékletet alább adtuk meg. Az egyenértékű kor számítása a 4.3. táblázat felhasználásával:

Időtartam, nap	A beton átlagos hőmérséklete, °C	Egyenértékű kor, nap
1	8,6	0,591
1	12,2	0,704
1	13,7	0,754
1	13,9	0,758
1	13,8	0,756
1	13,3	0,734
1	12,8	0,722
1	12,4	0,709
1	10,0	0,630
1	8,0	0,574
10		6,932

Tehát 10 nap múlva lehet a feszítőerőt ráengedni.

A másik ellenőrzési mód az, hogy egyidejűen kockákat készítünk és naponként ellenőrizzük a szilárdságot. A kocka hőmérséklete azonban rendszerint kisebb a szerkezet betonjánál, így az is rejt magában bizonytalanságot.

4.3. A hőmérséklet alakulása a bedolgozott betonban

A bedolgozott beton hőmérséklete a következő tényezőktől függ:

- A bedolgozott frissbeton hőmérséklete.

- Hidratációhő okozta felmelegedés, amely a cement fajtájától, a cementtartalomtól, a víz–cement tényezőőtől, adalékszerektől függ.
- Környezet: zsaluzat, a hőszigetelő burkolat hőszigetelő képessége, léghőmérséklet, szélsőbesség.
- Szerkezet: az alak, a keresztmetszeti terület és a kerület aránya, méretek.
- Utókezelés: a védelem, a takarás jellege és időtartama.
- A bedolgozott frissbeton hőmérséklete a betonkeverék hőmérsékletéből számítható.

A betonkeverék hőmérséklete a következő képletből számítható:

$$T_k = \frac{m_a \cdot c_a \cdot T_a + m_c \cdot c_c \cdot T_c + m_w \cdot c_w \cdot T_w}{m_a c_a + m_c \cdot c_c + m_w \cdot c_w} = \frac{\sum m_i \cdot c_i \cdot T_i}{\sum m_i \cdot c_i}$$

A képletben

$m_a, m_c,$ ill. m_w az adalékanyag, a cement, ill. a víz tömege, kg/m^3 ;

c_a az adalékanyag fajhője, kb. $0,84 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$;

c_c a cement fajhője, kb. $0,84 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$;

c_w a víz fajhője, kb. $4,2 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$;

$T_k, T_a, T_c,$ ill. T_w a betonkeverék, az adalékanyag, a cement, ill. a víz hőmérséklete, $^\circ\text{C}$.

4.3. példa. A beton összetétele:

300 kg/m^3 350 kspc 20,

150 kg/m^3 víz,

750 kg/m^3 homok,

1000 kg/m^3 kavics.

A betonhőmérséklet számítása:

Megnevezése	A betonalkotó				
	tömege $m_i \text{ kg/m}^3$	fajhője c_i ($\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)	hőmérséklete $T_i \text{ } ^\circ\text{C}$	$m_i \cdot c_i$	$m_i \cdot c_i \cdot T_i$
cement	300	0,84	5	252	1 260
víz	150	4,20	10	630	6 300
homok	750	0,84	5	630	3 150
kavics	1000	0,84	40	840	33 600
				2352	44 310

$$T_b = \frac{\sum m_i \cdot c_i \cdot T_i}{\sum m_i \cdot c_i} = \frac{44310}{2352} = 18,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

A betonkeverék hőmérséklete kb. $19 \text{ } ^\circ\text{C}$.

A bedolgozott frissbeton hőmérséklete következő képletből számítható:

$$T_b = T_k - 0,15 (T_k - T_1) \cdot \Delta t.$$

A 4.3. táblázat szerint az egyenértékű kor a következőképpen számítható:

A képletben

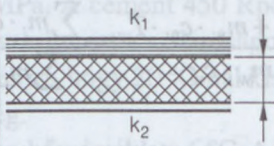
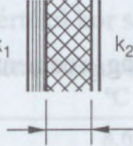
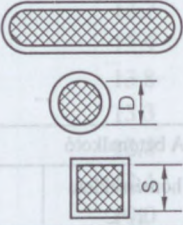
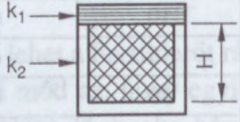
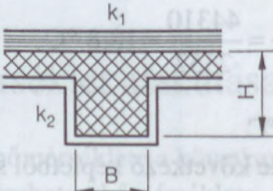
T_b a bedolgozott beton hőmérséklete, °C;

T_k a megkevert beton hőmérséklete, °C;

T_1 az átlagos léghőmérséklet szállítás és bedolgozás közben, °C;

Δt a keverés és a bedolgozás között eltelt idő (óra).

4.6. táblázat. Az alaki tényező és a hőátbocsátási tényező

Megnevezés	Szerkezeti elem	Alaki tényező	Σk
Lemez		Lemezvastagság	$k_1 + k_2$
Fal		Falvastagság	$k_1 + k_2$
Oszlop ovális kör alakú négyzetes		A/K^* 1/4D 1/4S	k
Négyzetes gerenda		H	$k_1 + \left(1 + \frac{2H}{B}\right) k_2$ közelítő érték
Lemezes gerenda		H	$k_1 + \left(1 + \frac{2H}{B}\right) k_2$ közelítő érték

Megjegyzés: *keresztmetszeti terület (A) osztva a kerülettel (K)

4.4. példa. Mennyi lesz a 4.3. példában megadott betonkeverék hőmérséklete a bedolgozás után, ha a léghőmérséklet +5 °C és a keverés és szállítás között eltelt idő 45 perc.

$$T_b = 18,8 - 0,15 (18,8 - 5) \cdot 0,75 = 18,8 - 1,5 = 17,3 \text{ °C.}$$

A bedolgozott frissbeton hőmérséklete ismeretében a szilárduló beton hőmérséklete eléggé megbízhatóan számítható *Furier* differenciálegyenlete felhasználásával. Erre találhatunk példát az 5.4.3. fejezetben, valamint [*Balázs-Fehér-Szombathy-Tóth-Zimonyi* (1982)] és [*Balázs-Tóth-Liptay-Zimonyi* (1981)] irodalomban. Az egyenlet megoldásához számítógép és az egyenletmegoldó ismeretek szükségesek. Ezért továbbiakban egyszerűsített számítási módot mutatunk be *Wesche* (1974) által ismertettek felhasználásával.

Az alak, a méret és a zsaluzat hatását a τ időállandóval vehetjük számításba.

$$\tau = \frac{V_b \cdot c_b \cdot \rho_b}{\sum k \cdot A_b},$$

ahol V_b a szerkezeti elem térfogata, m^3 ;

ρ_b a beton testsűrűsége, kg/m^3 ;

c_b a beton fajhője, $kJ/(kg \cdot K)$;

k hőátbocsátási tényező, $kJ/(m^2 \cdot K)$;

A_b a szerkezeti elem hőleadó felülete, m^2 ;

$\Sigma k \cdot A_b$ az a hőmennyiség, amelyet a szerkezet óránként és °C hőmérséklet-különbségenként lead, $kJ/(h \cdot K)$;

$c_b \cdot \rho_b$ a szakasos betonok esetében kb. $2500 \text{ kJ}/(m^3 \cdot K)$.

Bevezetve a $Z = V_b/A_b$ alakú tényezőt és a $c_b \cdot \rho_b = 2500$ helyettesítést, τ időállandó képlete a következő lesz:

$$\tau = \frac{2500 \cdot Z}{\sum k}.$$

Az alakú és a hőátbocsátási tényező számítására vonatkozó tájékoztató adatokat a 4.6. táblázatban, a hőtechnikai jellemzők számításához használható tájékoztató adatokat pedig a 4.7. táblázatban adtuk meg.

A bedolgozott t korú beton hőmérséklete a bedolgozott frissbeton hőmérsékletéből, a t időtartam alatt keletkezett hidratációhőből, és a hőveszteségből tevődik össze.

$$T_{b,t} = T_{b,0} + \frac{m_c \cdot q_{c,t}}{c_b \cdot \rho_b} - \frac{1}{\pi} \sum_0^t (T_b - T_l) \cdot \Delta t$$

hőmérséklet-emelkedés	hőveszteség
a hidratációhő miatt	a külső tényezők miatt

A képletben

$T_{b,t}$ a beton átlagos hőmérséklete t időpont múlva, (°C);

$T_{b,0}$ a bedolgozott frissbeton hőmérséklete, (°C);

T_b a beton becsült hőmérséklete adott időpontban, (°C);

Δt a szilárdulás időtartama, (h);

$q_{c,t}$ a hidratáció hő t időpontig, (kJ/kg).

4.7. táblázat. A cementek kémiai és ásványi összetétele

Anyag	Test-, ill. halmazsűrűség, kg/m ³	Fajhő, c $\frac{kJ}{kg \cdot K}$	Hővezetési tényező, λ $\frac{W}{m \cdot K}$	Hőátadási tényező, a $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
Vasbeton	2400	0,84	1,55	15,0
Kvarckavicsbeton	2200	0,84	1,28	13,0
Fenyőfa rostokra párhuzamos	400	2,51	0,13	3,05
	550	2,51	0,19	4,30
Farostlemez	400	2,26	0,10	2,58
	450	2,26	0,11	2,58
	500	2,26	0,12	3,08
Faforgácslap	650	2,34	0,16	4,23
Rétegelt falemez	750	2,34	0,19	4,86
Duzzasztott perlit	680	2,51	0,13	2,90
	80	1,17	0,047	0,57
	110	1,17	0,052	1,32
	130	1,17	0,081	0,94
Ásványgyapot	100	0,75	0,042	0,48
	150	0,75	0,044	0,61
	200	0,75	0,051	0,74
Műanyagkötésű ásványgyapot lemezek	80	0,84	0,042	0,45
	100	0,84	0,045	0,52
	150	0,84	0,049	0,66
Kemény, felületileg kezelt ásványgyapot termékek	250	0,84	0,042	0,79
	350	0,84	0,050	1,04
	450	0,84	0,055	1,22
Lágy poliuretánhab	30	1,42	0,045	0,37
Kemény poliuretánhab	40	1,42	0,034	0,37
Polisztirolhab	15	1,46	0,040	0,25
Üveggyapot	160	0,84	0,046	0,66
	200	0,84	0,058	0,84
Szalmapaplan	150	1,47	0,06	0,95
Nádlemez	175	1,47	0,06	1,06
Acél	7850	0,46	58,1	123

A számítási mód használatát példákban mutatjuk be.

4.5. példa. Adott egy 24 cm vastag lemezes betonelem. Betonösszetétel:

$$450 \text{ kg/m}^3 \text{ 450 pc,}$$

$$144 \text{ kg/m}^3 \text{ viz,}$$

$$1856 \text{ kg/m}^3 \text{ adalékanyag,}$$

$$\rho_b = 2450 \text{ kg/m}^3.$$

A betont olyan acélzsaluzatban készítjük, amelyen 40 mm vastag műanyaghab (Nikecell) szigetelő réteg van. Ugyanez van a zsaluzatlan felületen is.

Kérdés: mennyi idő alatt éri el a beton az 50%-os érettségi állapotot?

Megoldás

1. lépésben kiszámítjuk a betonhőmérséklet időbeni alakulását. Az acélsablon hővezetéséből adódó veszteséget elhanyagoljuk.

$$Z = \frac{V_b}{A_b} = 0,24 \text{ m.}$$

k értéke a 4.7. táblázatból a következőképpen számítható; mivel $1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}) = 3,6 \text{ kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{K})$

$$k = 3,6 \frac{\lambda}{d} + a = 3,6 \frac{0,400 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}}{0,04 \text{ m}} + 0,25 = 3,85 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}},$$

$$\sum k = 2k = 2 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}} = 7,70 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}},$$

$$c_b \cdot \rho_b = 0,84 \cdot 2450 = 2058 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$$

$$c_b = 0,84 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$\tau = \frac{Z \cdot c_b \cdot \rho_b}{\sum k} = \frac{0,24 \cdot 2058}{7,70} = \frac{494}{7,70} = 64,0 \text{ h.}$$

A bedolgozott frissbeton hőmérséklete

$$T_{b,0} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

A gyártócsarnok átlagos hőmérséklete

$$T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\frac{m_c}{c_b \cdot \rho_b} = \frac{300}{2058} = 0,146 \text{ kg} \cdot \text{K} / \text{kJ}$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{64,0} = 0,0156 \text{ 1/h}$$

Először felrajzoljuk a

$$T_{b,0} = \frac{m_c}{c_b \cdot \rho_b} \cdot q_{c,t}$$

görbét, amely behelyettesítve az állandókat:

$$20 + 0,146 \cdot q_{c,t}$$

A $q_{c,t}$ (a hidratáció hő a kor függvényében) függvényt, ha a bedolgozott frissbeton hőmérséklete 20 °C , akkor az 5.10. ábrából vehetjük.

Továbbiakban a 4.29. ábrán feltüntetett alsó görbéből induljunk ki.

Pl. 10 óras korban $20 + 0,146 \cdot 100 = 34,6\text{ °C}$,

20 óras korban $20 + 0,146 \cdot 165 = 44,1\text{ °C}$.

Ezt a függvényt a 4.30. ábra 1 jelű görbéje szemlélteti (a kerekített értékeket tüntettük fel).

Ebből a görbéből kivonjuk a hőveszteséget:

$$\frac{1}{\tau} \sum_0^t (T_b - T_l) \cdot \Delta t$$

T_b értékét úgy becsültük meg, hogy 0–10 óra között az 1 jelű görbeszakasz átlag-hőmérsékletét vettük számításba. 10–20 óra között úgy számítottuk T_b -t, hogy az 1 jelű görbe hőmérsékleti pontjait (35 , ill. 44 °C) a 10 óras korban kiszámított hőveszteséggel csökkentettük ($34,6$, ill. $43,6\text{ °C}$) és ennek képeztük az átlagát. Így folytatunk tovább.

Pl. 10 óras korban

$$0,0156 \left(\frac{20+35}{2} - 25 \right) \cdot 10 = 0,0156 \cdot 2,5 \cdot 10 = 0,39\text{ °C} \approx 0,4\text{ °C},$$

20 óras korban

$$0,4 + 0,0156 \left(\frac{34,6+43,6}{2} - 25 \right) \cdot 10 = 0,4 + 0,0156 \cdot 14,1 \cdot 10 = 2,6\text{ °C},$$

30 óras korban

$$2,6 + 0,0156 \left(\frac{41,4+46,4}{2} - 25 \right) \cdot 10 = 2,6 + 0,0156 \cdot 18,9 \cdot 10 = 2,60 + 3,0 = 5,6\text{ °C},$$

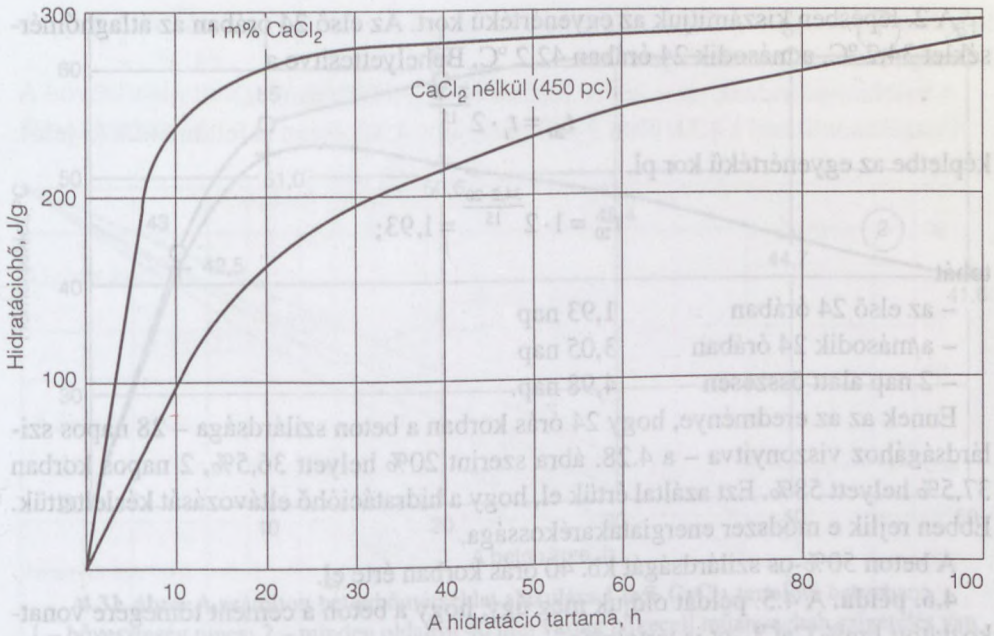
40 óras korban

$$5,6 + 0,0156 \left(\frac{43,4+46,4}{2} - 25 \right) \cdot 10 = 5,6 + 0,0156 \cdot 19,9 \cdot 10 = 5,6 + 3,1 = 8,7\text{ °C},$$

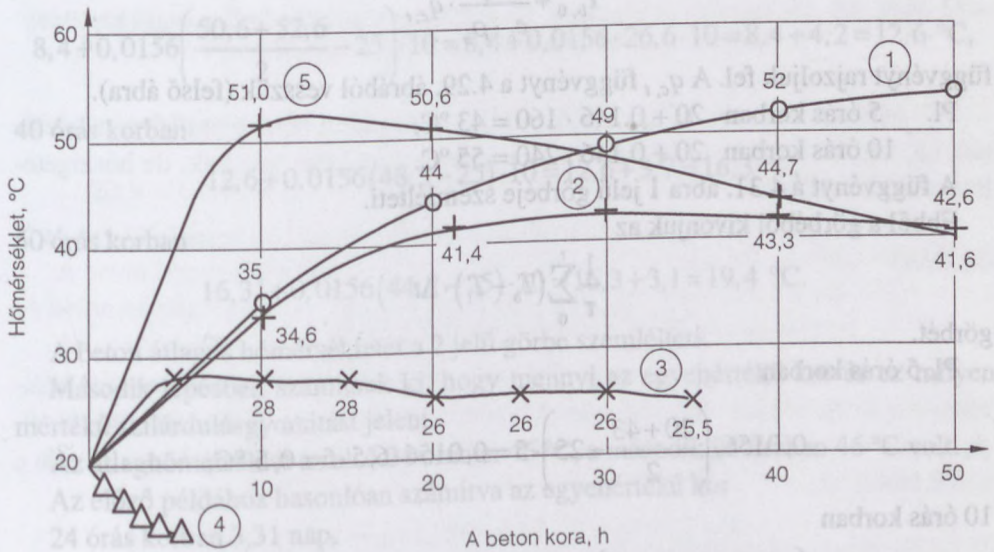
50 óras korban

$$8,4 + 0,0156 \left(\frac{43,3+45,3}{2} - 25 \right) \cdot 10 = 8,4 + 0,0156 \cdot 19,3 \cdot 10 = 8,4 + 3,0 = 11,4\text{ °C}.$$

Az 1 jelű görbe veszteségekkel csökkentett értékeit a 2. jelű görbe szemlélteti.



4.29. ábra. A példában felhasznált hidratációhő-korfüggvények



4.30. ábra. A számított betonhőmérséklet alakulása különböző szigetelés és léghőmérséklet esetén.

- 1 – hővesztéség nincs; 2 – minden oldalról 40 mm vastag Nikecell műanyaghab szigetelés;
 3 – hőszigetelés nincs; 4 – hőszigetelés nincs, frissbeton hőmérséklete 20 °C,
 léghőmérséklet 5 °C; 5 – mint 2. de 1 m% CaCl₂-dal

A 2. lépésben kiszámítjuk az egyenértékű kort. Az első 24 órában az átlaghőmérséklet 34,2 °C, a második 24 órában 42,2 °C. Behelyettesítve a

$$t_{20} = t_i \cdot 2^{\frac{T_i - 20}{15}}$$

képletbe az egyenértékű kor pl.

$$t_{20} = 1 \cdot 2^{\frac{34,2 - 20}{15}} = 1,93;$$

tehát

- az első 24 órában 1,93 nap
- a második 24 órában 3,05 nap
- 2 nap alatt összesen 4,98 nap.

Ennek az az eredménye, hogy 24 órás korban a beton szilárdsága – 28 napos szilárdságához viszonyítva – a 4.28. ábra szerint 20% helyett 36,5%, 2 napos korban 37,5% helyett 58%. Ezt azáltal értük el, hogy a hidratációhő eltávozását késleltettük. Ebben rejlik e módszer energiatakarékossága.

A beton 50%-os szilárdságát kb. 40 órás korban érte el.

4.6. példa. A 4.5. példát oldjuk meg úgy, hogy a beton a cement tömegére vonatkoztatott 1 m% CaCl₂-ot is tartalmaz.

Az első példához hasonlóan először a

$$T_{b,0} + \frac{m_c}{c_b \cdot \rho_b} \cdot q_{c,t}$$

függvényt rajzoljuk fel. A $q_{c,t}$ függvényt a 4.29. ábrából vesszük (felső ábra).

Pl. 5 órás korban $20 + 0,146 \cdot 160 = 43$ °C,

10 órás korban $20 + 0,146 \cdot 240 = 55$ °C.

A függvényt a 4.31. ábra 1 jelű görbéje szemlélteti.

Ebből a görbéből kivonjuk az

$$\frac{1}{\tau} \sum_0^t (T_b - T_l) \cdot \Delta t$$

görbét.

Pl. 5 órás korban

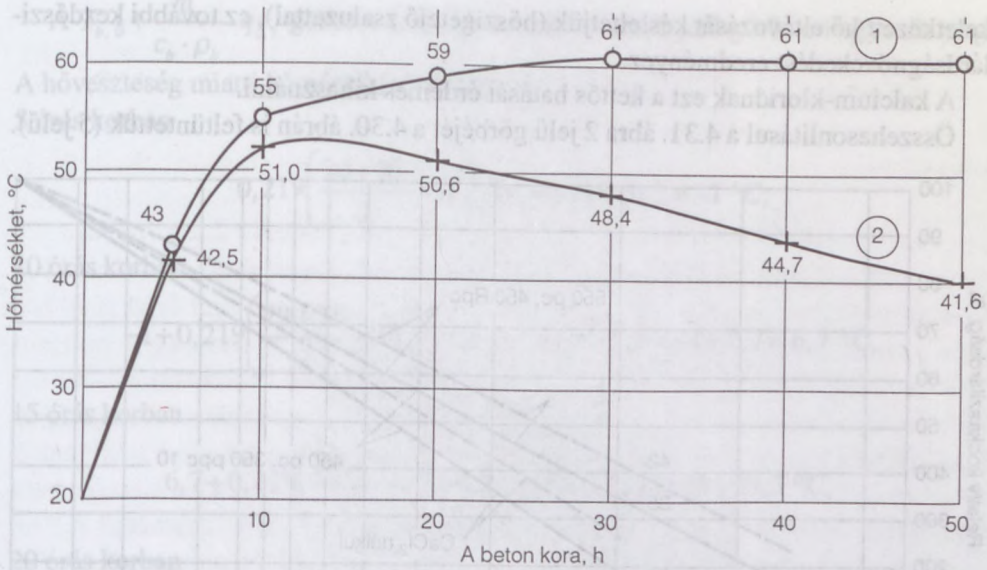
$$0,0156 \cdot \left(\frac{20 + 43}{2} - 25 \right) \cdot 5 = 0,0156 \cdot 6,5 \cdot 5 = 0,5 \text{ °C,}$$

10 órás korban

$$0,5 + 0,0156 \left(\frac{42,5 + 54,5}{2} - 25 \right) \cdot 5 = 0,5 + 0,0156 \cdot 22,5 \cdot 5 = 0,5 + 3,5 = 4,0 \text{ °C,}$$

20 órás korban

$$4,0 + 0,0156 \left(\frac{51,00 + 55,0}{2} - 25 \right) \cdot 10 = 4,0 + 0,0156 \cdot 28,0 \cdot 10 = 4,0 + 4,4 = 8,4 \text{ °C,}$$



4.31. ábra. A számított betonhőmérséklet alakulása 1 m% CaCl_2 -tartalmú betonban.
1 – hővesztésig nincs; 2 – minden oldalról 40 mm vastag Nikecell műanyaghab szigetelés van

30 óras korban

$$8,4 + 0,0156 \left(\frac{50,6 + 52,6}{2} - 25 \right) \cdot 10 = 8,4 + 0,0156 \cdot 26,6 \cdot 10 = 8,4 + 4,2 = 12,6 \text{ } ^\circ\text{C},$$

40 óras korban

$$12,6 + 0,0156 (48,5 - 25) \cdot 10 = 12,6 + 3,7 = 16,3 \text{ } ^\circ\text{C},$$

50 óras korban

$$16,31 + 0,0156 (44,7 - 25) \cdot 10 = 16,3 + 3,1 = 19,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

A beton átlagos hőmérsékletét a 2 jelű görbe szemlélteti.

Második lépésben számítsuk ki, hogy mennyi az egyenértékű kor és ez milyen mértékű szilárdulásgyorsítást jelent.

Az átlaghőmérséklet az első 24 órában $46 \text{ } ^\circ\text{C}$, a második 24 órában $46 \text{ } ^\circ\text{C}$ volt.

Az előző példához hasonlóan számítva az egyenértékű kor

24 óras korban 3,31 nap,

48 óras korban 6,62 nap.

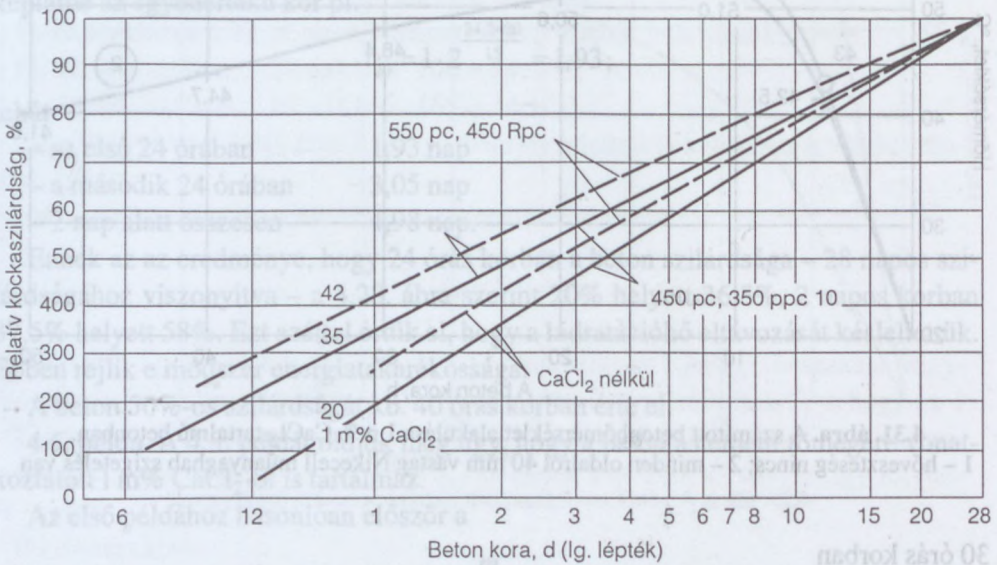
A 4.32. ábrából ennek 24 óras korban megfelel 59%-os, 48 óras korban 73%-os hatásfok. A CaCl_2 hatása az első 24 órában nagy. Szemben a CaCl_2 nélküli betonnal, az 50%-os hatásfok eléréséhez nem kellett 24 óra.

A kalcium-klorid hatása az, hogy egyrészt meggyorsítja a kezdeti szilárdulást, másrészt ennek következményeként meggyorsítja a kezdeti hőfelszabadulást. Ha a

keletkezett hő eltávozását késleltetjük (hőszigetelő zsaluzattal), ez további kezdőszilárdságnövekedést eredményez.

A kalcium-kloridnak ezt a kettős hatását érdemes kihasználni.

Összehasonlításul a 4.31. ábra 2 jelű görbéjét a 4.30. ábrán is feltüntettük (5 jelű).



4.32. ábra. 300–400 kg/m³ cementtartalmú, 1 m% kalcium-klorid-tartalmú, gyengén képlékeny betonok relatív kockaszilárdsága 20 °C hőmérsékleten

4.7. példa. Számítsuk ki úgy a 4.5. példában megadott betonelem hőmérsékletének időbeni alakulását, hogy az elemet a gyártócsarnokban hagyjuk, de hőszigetelést nem használunk.

Ebben az esetben lényegesen megváltozik k értéke. A szabad betonfelületen (4.7. táblázat)

$$k_1 = 3,6 \cdot 15 = 54 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}).$$

Ugyanekkorát vegyünk fel az acéllal zsaluzott felületre is. Ugyanis az acél hőátadási tényezője sokkal nagyobb, mint a betoné, de annál nagyobbat nem indokolt figyelembe venni, mintha a beton szabad felületű lenne. (Tehát az acél nem gátolja a beton lehűlését).

$$k = k_1 + k_2 = 2 \cdot 54 = 108 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}),$$

$$\tau = \frac{Z \cdot c_b \cdot \rho_b}{\sum k} = \frac{0,24 \cdot 2058}{108} = \frac{494}{108} = 4,57 \text{ h},$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{4,57} = 0,219 \frac{1}{\text{h}}.$$

A $T_{b,0} + \frac{m_c}{c_b \cdot \rho_b} \cdot q_{c,t}$ görbe a 4.30. ábrán feltüntetett 1 jelű görbével egyezik meg.

A hőveszteség miatti hőmérséklet-csökkenés:

5 óras korban

$$0,219 \left(\frac{20+28}{2} - 25 \right) \cdot 5 = -0,219 \cdot 1 \cdot 5 = -1 \text{ } ^\circ\text{C},$$

10 óras korban

$$-1 + 0,219 \left(\frac{29+35}{2} - 25 \right) \cdot 5 = -1 + 0,219 \cdot 7 \cdot 5 = -1 + 7,7 = 6,7 \text{ } ^\circ\text{C},$$

15 óras korban

$$6,7 + 0,219 \left(\frac{28+34}{2} - 25 \right) \cdot 5 = 6,7 + 0,219 \cdot 6 \cdot 5 = 13,3 \text{ } ^\circ\text{C},$$

20 óras korban

$$13,3 + 0,219 \left(\frac{28+31}{2} - 25 \right) \cdot 5 = 13,3 + 0,219 \cdot 4,5 \cdot 5 = 13,3 + 4,9 = 18,2 \text{ } ^\circ\text{C},$$

25 óras korban

$$18,2 + 0,219 \left(\frac{26+29}{2} - 25 \right) \cdot 5 = 18,2 + 0,219 \cdot 2,5 \cdot 5 = 18,2 + 2,7 = 20,9 \text{ } ^\circ\text{C},$$

30 óras korban

$$20,9 + 0,219 \left(\frac{26+28}{2} - 25 \right) \cdot 5 = 20,9 + 0,219 \cdot 2 \cdot 5 = 20,9 + 2,2 = 23,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

A beton hőmérsékletének időbeni alakulását a 4.30. ábra 3 jelű görbéje szemlélteti. A beton hőmérséklete 30 óra alatt megközelítette a léghőmérsékletet ($25 \text{ } ^\circ\text{C}$).

4.8. példa. A 4.7. példát úgy is oldjuk meg, hogy a léghőmérséklet $T_l = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

A hőmérséklet-csökkenés

5 óras korban

$$0,219 \left(\frac{20+28}{2} - 5 \right) \cdot 5 = 0,219 \cdot 19,5 = 20,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Tehát 5 óra múlva – szabad felület esetén – az átlagos hőmérséklet $28 - 20,8 = 7,2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Ebben az esetben azonban az 5 órás lépcső nagyon nagy. Ha 1 órás lépcsőket veszünk, akkor a hőmérséklet-csökkenés

1 óra múlva

$$0,219 \left(\frac{20+21,5}{2} - 5 \right) \cdot 1 = 0,219 \cdot 15,75 \cdot 1 = 3,4 \text{ } ^\circ\text{C},$$

2 óra múlva

$$3,4 + 0,219 \left(\frac{18,1 + 19,6}{2} - 5 \right) \cdot 1 = 3,4 + 0,219 \cdot 13,2 \cdot 1 = 3,4 + 3,0 = 6,4 \text{ } ^\circ\text{C},$$

3 óra múlva

$$6,4 + 0,219 \left(\frac{16,6 + 18,1}{2} - 5 \right) \cdot 1 = 6,4 + 0,219 \cdot 12,35 \cdot 1 = 6,4 + 2,7 = 9,1 \text{ } ^\circ\text{C},$$

4 óra múlva

$$9,1 + 0,219 \left(\frac{15,4 + 16,9}{2} - 5 \right) \cdot 1 = 9,1 + 0,219 \cdot 11,15 \cdot 1 = 9,1 + 2,4 = 11,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

5 óra múlva

$$11,5 + 0,219 \left(\frac{14,5 + 16,0}{2} - 5 \right) \cdot 1 = 11,5 + 0,219 \cdot 10,25 \cdot 1 = 11,5 + 2,2 = 13,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Ebből a számításból az is látható, hogy a $(T_b - T_l)$ hőmérséklet-különbség akár kicsi, akár nagy, akár a hőfejlődés sebessége nagy, sűrűbb időlépcsőket kell választani. Ebben a példában mindhárom tényező hatása nagy volt. A számított hőmérséklet-csökkenés különbsége $20,8 - 13,7 = 7,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ volt, ha nem 5 órás, hanem 1 órás lépcsőket vettünk fel.

A számítás eredményeként a hőmérséklet időbeni alakulását a 4.30. ábra 4 jelű görbéje szemlélteti.

Ez az ábra jól szemlélteti a hőszigetelés hatását és ezáltal annak az energiatakarékosságban betöltött szerepét.

A bemutatott számítással ellenőrizhető, hogy mikor érdemes ezt az energiatakarékosság céljaira felhasználni.

Ebben nagy szerepe van a térfogat és a hőleadó felület (Z) arányának.

Nem szabad figyelmen kívül hagyni azt sem, hogy a 4.7. táblázatban megadott anyagjellemzők arra az esetre vonatkoznak, amikor szélcsendes idő van. A szél hatására a hőátadási tényező meg is kétszereződhet. A szél hatásának a számításba vételére a [Balázs–Tóth–Liptay–Zimonyi (1981)]-ben mutattunk be példát.

A példákban ismertetetthez hasonlóan megoldhatók a következő feladatok:

- Mikor fagy meg a beton és addig mekkora szilárdságot ér el?
- Milyen védelmet kell nyújtani, ill. mennyire kell felmelegíteni a frissbetont, hogy megfagyás előtt megadott szilárdságot érjen el?
- Milyen sablonforduló érhető el az üzemi előregyártásban?

4.4. Egyszeri megfagyás hatása a beton természetes szilárdulására

[Balázs (2001)]

4.4.1. A kritikus szilárdság

A klasszikus felfogás szerint [Palotás (1961), Palotás–Balázs (1980)]: „egyszeri, rövid ideig tartó fagy hatására a kötésnek nem indult, kb. 4–6 órás betonban lévő víz megfagy, s így a cement kötése meg sem kezdődik. Felengedés után a kötés megindul, s a beton rendszerint némi csökkenéssel eléri a tőle várható szilárdságot. A részben megkötött, kötésközbeni (4–24 órás) betont a fagyás során szerkezetében olyan rombolás érheti, hogy felengedés utáni továbbszilárdulása után sem éri már el normálisan elérhető szilárdságát. A 10–15 MPa nyomószilárdságot elért betonnak a fagy már nem árt.” A szilárduló beton fagyhatással szembeni [Palotás–Balázs (1980)] viselkedésének a jellemzésére ezt a szilárdságot használják, amit kritikus szilárdságnak neveznek. A kritikus szilárdságra az MI-04.19–81 10–15 MPa-t adott meg, Szizov (1953) azt a szilárdságot tekinti kritikus szilárdságnak, amelynél megfagyott beton szilárdságvesztése 10–15%-nál nem több. Ehhez kis szilárdságú betonoknál 3–3,5 MPa, B200–B300 jelű betonoknál a tervezett 28 napos szilárdság 25%-a szükséges. Nincs szilárdságvesztés, ha utóbbi beton relatív szilárdsága eléri a 10–15 MPa-t. A kritikus szilárdságot szovjet előírások a tervezett szilárdság 20%-ában, német szabványok 15, svájci szabványok 10 MPa-ban adták meg. A RILEM-irányelvek [Zement Taschenbuch (1976–77)] a cementfajtától és a beton fagyhatás előtti hőmérsékletétől függően szükséges szilárdulási időt adnak meg, ami gyakorlatilag kritikus szilárdságnak tekinthető. Wesche (1974) az 5 MPa-t általában kielégítőnek tartja. A fagyás mechanizmusával foglalkozott Setzer (1987), Powers (1956), Kunszt (1961, 1962), Mironov (1962) is. A téli betonozás elméletét és módszereit Mironov (1953) és Szizov (1953) foglalta össze.

4.4.2. Kutatásaink

Mivel a kritikus szilárdság bizonytalanak tűnt, és a beton hidegben tárolhatóságára voltak hazai kutatási eredmények is [Balázs–Kilián (1953), Weiss (1952, 1953)], a fagybani viselkedésére nem, ezért a KPM megbízásából 1959-ben kutattuk [Balázs (1961)], hogy a természetesen szilárduló beton mikor tehető ki a fagy hatásának károsodás nélkül. A kísérlet során 450, ill. 300 kg/m³ tatabányai 600 pc-t használtunk. Az adalékanyag osztályozott folyami homokoskavics volt, ennek a finomsági modulusa az érvényes szitasoron 6,2. A beton víz–cement tényezője 0,36, ill. 0,50, konzisztenciája gyengén képlékeny, a cement fajlagos felülete 270 m²/g volt. A betonokat

elkészítésük után különböző ideig 18 ± 1 °C hőmérsékletű térben tároltuk, majd -10 °C hőmérsékletű fagyasztóba tettük. A fagyhatás időtartama változó volt, ami – a kísérletek szerint – nem befolyásolta a felengedés utáni szilárdulást.

A betonszilárdság fagyhatás előtti és utáni értékeit a 4.8. táblázatban tüntettük fel. A fagyhatás tartamán a szilárdságnövekedést azzal magyarázzuk, hogy a szilárdulási vizsgálat után és előtt a hőmérséklet-változáshoz idő kellett, és hogy -10 °C hőmérsékleten sem szünetelt teljesen a szilárdulás.

4.8. táblázat. A betonszilárdság a fagyhatás előtt és után

Cementtartalom, kg/m ³	Víz-cement tényező	CaCl ₂ m%	10 óras		18,5 óras	
			korban fagyhatásnak kitett beton kockaszilárdsága, MPa			
			fagyhatás előtt	fagyhatás előtt	fagyhatás után	
450	0,36	–	2,0	4,5	5,9	
300	0,50	–	1,4	2,6	3,9	
450	0,36	1	10,1	12,0	15,3	
300	0,50	1	3,8	5,9	7,7	

A 20 °C-os térben tárolt, majd 10, ill. 18,5 óras korban fagyhatásnak kitett, 450 kg/m³ cementtartalmú beton a felengedés után 18 °C-os vízben tárolva lényegesen gyorsabban szilárdult, mint a kezdettől fogva 18 °C-os vízben tárolt beton (3.57. ábra). Az eredményekből arra lehet következtetni, hogy ezeknek a betonoknak legalább 450 kg/m³ cementtartalom esetén a végszilárdsága is nagyobb lett, mint a végig vízben tároltaké. 300 kg/m³ cementtartalom esetén ez a hatás valamivel csökkent.

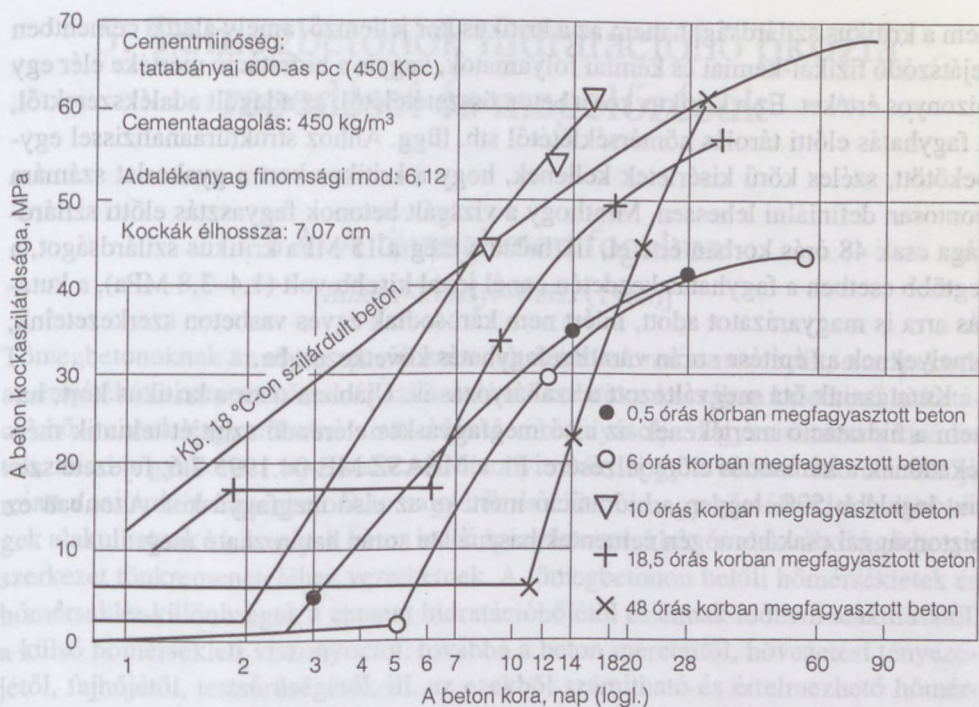
1 m% CaCl₂-tartalmú, 10 és 18,5 óras korban megfagyasztott betonok is kedvezően szilárdultak a fagyhatás után. 2 m% CaCl₂-tartalom esetén ez a kor előbbre tolódott. Ezt a CaCl₂-nak a cementhidratációra gyakorolt hatásával magyarázzuk.

Ha a betont 1–5 napos 4–5 °C hőmérsékletű térben tárolás után helyeztük -10 °C-os hőmérsékletű térbe, akkor a fagyhatás előtti 1 napos tárolás volt a fagyhatás utáni szilárdulást tekintve a legkedvezőbb. Ez a kísérlet azt is egyértelműen mutatta, hogy nem szünetelt teljesen a szilárdulás -10 °C hőmérsékletű térben sem.

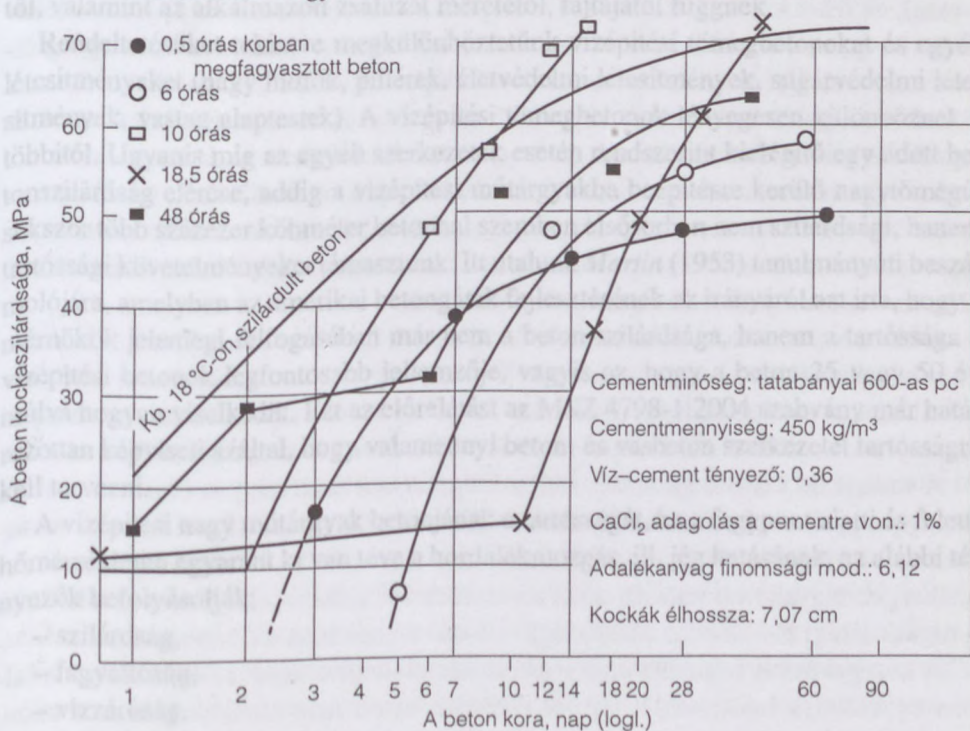
Ezek a kísérletek ellentmondani látszanak a klasszikus felfogásnak, amely szerint ha a beton megfagy, mielőtt a kötés megindul, akkor felengedés után zavartalanul szilárdul. Ugyanis a 0,5 óras korban lehűtött betonnál nem tapasztaltuk a zavartalan szilárdulást, amikor pedig a szilárdsága még nem volt mérhető.

A kísérletek új eredményre vezettek. Ugyanis azt mutatták, hogy mind a vegyszer nélküli, mind az 1 m% kalcium-klorid-tartalmú betonokban van a cement hidratációs folyamatának olyan stádiuma, amelyben a beton megfagyása előnyösen hat felengedés utáni szilárdulására. Ez a kedvező hatás – a kísérlet körülményei között – a 10–18,5 óras korban megfagyasztott betonoknál jelentkezett (4.33. és 4.34. ábra).

Ez a kutatás megvilágította, hogy azért adhatnak meg a kritikus szilárdságra igen eltérő korlátot, mert a szilárduló betonnak a fagyhatással szembeni viselkedésére



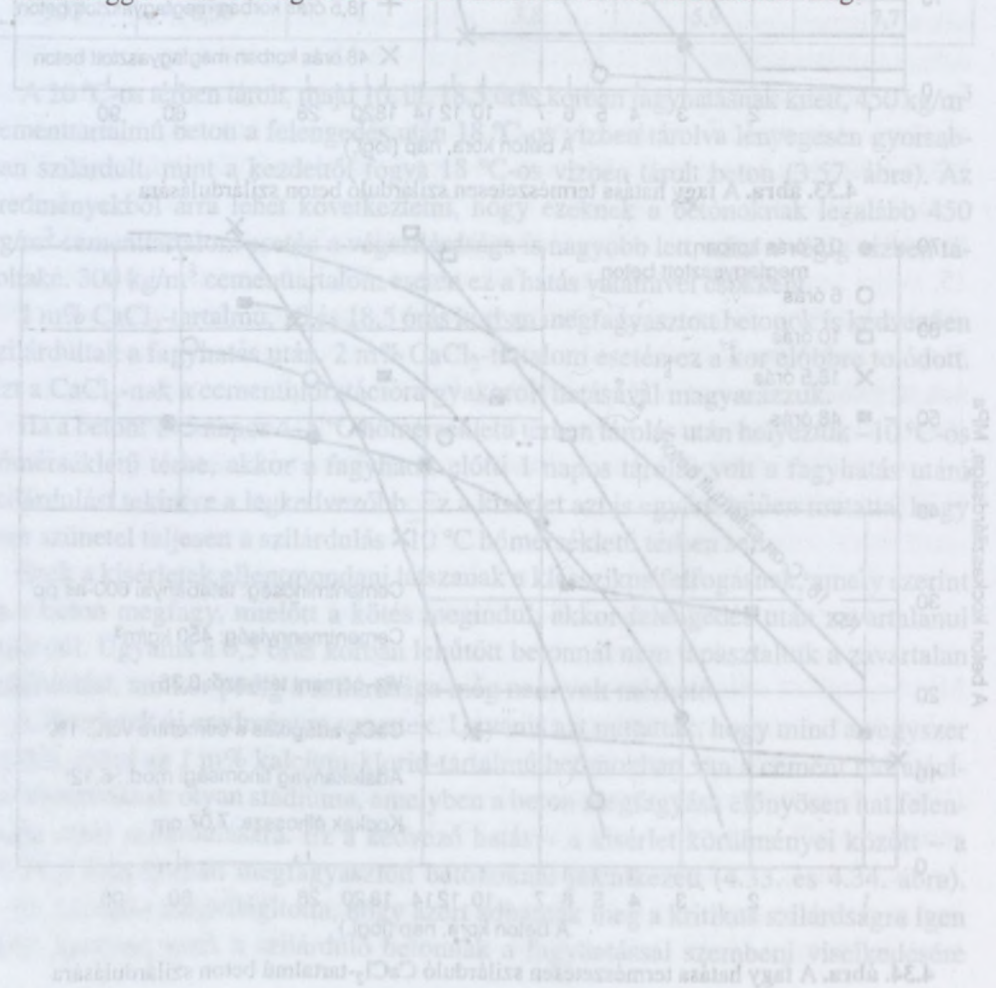
4.33. ábra. A fagy hatása természetesen szilárduló beton szilárdulására



4.34. ábra. A fagy hatása természetesen szilárduló CaCl₂-tartalmú beton szilárdulására

nem a kritikus szilárdság, hanem az a kritikus kor jellemző, amely alatt a cementben lejátszódó fizikai-kémiai és kémiai folyamatok, vagyis a hidratáció mértéke elér egy bizonyos értéket. Ez a kritikus kor a beton összetételétől, az adagolt adalékszerektől, a fagyhatás előtti tárolás hőmérsékletétől stb. függ. Ahhoz struktúraanalízissel egybekötött, széles körű kísérletek kellene, hogy a kritikus kort a gyakorlat számára pontosan definiálni lehessen. Minthogy a vizsgált betonok fagyasztás előtti szilárdsága csak 48 órás korban érte el, ill. haladta meg a 15 MPa kritikus szilárdságot, a legtöbb esetben a fagyhatás kezdetén ennél jóval kisebb volt (1,4–3,8 MPa), a kutatás arra is magyarázatot adott, miért nem károsodtak egyes vasbeton szerkezeteink, amelyeknek az építése során váratlan fagyhatás következett be.

Kutatásaink óta megváltozott a szabályozás is. Újabban nem a kritikus kort, hanem a hidratáció mértékének az első megfagyáskor elérendő szintjét tekintik mértékadónak a károsodás előre jelzésére. Pl. a MÉASZ ME-04.1995 7.6. fejezete szerint legalább 50% legyen a hidratáció mértéke az első megfagyáskor. Azonban ez biztonsággal csak homogén cementek használata során határozható meg.



5. Tömegbetonok hidratációhő okozta repedései és megelőzésük

5.1. A tömegbeton fogalma

[Balázs–Erdélyi–Weiss (1968)]

Tömegbetonoknak az olyan speciális rendeltetésű betonokat nevezzük, amelyeknek az erőjátékát a cement kötése és szilárdulása kezdeti szakaszában keletkező hidratáció hő – annak nagy méretei miatt – döntően befolyásolja. Ugyanis mind a kísérletek, mind a gyakorlati tapasztalat azt bizonyították, hogy a cement hidratációhője miatt a szilárduló tömegbetonban nagy hőmérséklet és nagy hőmérséklet-különbségek alakulhatnak ki, amelyek káros belső igénybevételekhez és alakváltozásokhoz, a szerkezet tönkremeneteléhez vezethetnek. A tömegbetonon belüli hőmérsékletek és hőmérséklet-különbségek a cement hidratációhőjétől és annak időbeni alakulásától, a külső hőmérsékleti viszonyoktól, továbbá a beton méreteitől, hővezetési tényezőjétől, fajhőjétől, testsűrűségétől, ill. az ezekből számítható és értelmezhető hőmérséklet-vezetési tényezőtől (diffuzivitástól), a beton kezdeti (beépítési) hőmérsékletétől, valamint az alkalmazott zsaluzat méretétől, fajtájától függenek.

Rendeltetésüket tekintve megkülönböztetünk vízepítési tömegbetonokat és egyéb létesítményeket (nagy hídfők, pillérek, életvédelmi létesítmények, sugárvédelmi létesítmények, vastag alaptestek). A vízepítési tömegbetonok lényegesen különböznek a többitől. Ugyanis míg az egyéb szerkezetek esetén rendszerint kielégítő egy adott betonszilárdság elérése, addig a vízepítési műtárgyakba beépítésre kerülő nagytömegű, sokszor több százezer köbméter betonnal szemben elsősorban nem szilárdsági, hanem tartóssági követelményeket támasztunk. Itt utalunk *Martin* (1953) tanulmányúti beszámolójára, amelyben az amerikai betongátak fejlesztésének az irányáról azt írta, hogy a mérnökök jelenlegi felfogásában már nem a beton szilárdsága, hanem a tartóssága a vízepítési betonok legfontosabb jellemzője, vagyis az, hogy a beton 25 vagy 50 év múlva hogyan viselkedik. Ezt az előrelátást az MSZ 4798-1:2004 szabvány már határozottan képviseli azáltal, hogy valamennyi beton- és vasbeton szerkezetet tartósságra kell tervezni.

A vízepítési nagy műtárgyak betonjának a tartósságát, ha a fagyponthoz alatti és feletti hőmérsékleten egyaránt ki van téve a hordalékmozgás, ill. jég hatásának, az alábbi tényezők befolyásolják:

- szilárdság,
- fagyállóság,
- vízzáróság,
- kopásállóság,

- ellenállás a kavitáció és egyéb ütésekkel szemben,
- ellenállás a betont érő külső víz (talajvíz, tárolt, ill. folyóvíz) és hordalék agresszivitásával, valamint a belső (cementpép és adalékanyag közti vegyi reakciók) vegyi hatásokkal szemben,
- mozgások, vagy megakadályozásuk esetén feszültségek, ill. repedések keletkezése a betonban amiatt, hogy eltérő hőtágulású, ill. eltérő zsugorodású és duzzadású anyagokat tartalmaz.

A hordalékmozgás, ill. a jég hatásának kitett vízepítési műtárgyaknak azonban csak e hatásoknak kitett felületét teszik alkalmassá ezek felvételére. A vízepítési tömegbetonnak ezt a részét kopásálló vízepítési betonnak nevezzük.

Továbbiakban csak a hidratációhő okozta repedésveszéllyel és ennek megelőzésével foglalkozunk.

5.2. A kéreg- és átmenő repedések fogalma

Ha a cementet (betont) vízzel összekevertük, akkor a víz hatására megindul a kémiai reakció, amit összefoglalóan hidratációnak, és a hidratáció során felszabaduló, tömegegységre vonatkoztatott reakcióhőt **hidratációhőnek** nevezzük.

A hidratációhő hatására a beton felmelegszik. Ez lehet hasznos (pl. téli betonozás esetén), de lehet káros is. Különösen vastagfalú szerkezetben a felmelegedés a lehűlés során egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás, az egyenlőtlen kiszáradás miatt egyenlőtlen zsugorodás léphet fel. Mivel az ezekből fellépő alakváltozások nem játszódhatnak le szabadon, gátolt alakváltozás esete áll fenn, amelyből feszültségek keletkeznek és repedések keletkezhetnek. Célunk az, hogy a repedések keletkezését megelőzzük.

Kutatásaink során a zsugorodás okozta feszültségektől eltekintünk, mivel bármelyik tervbe vett zsaluzat esetén a betonból – a kiszaluzásig – a víz nem távozhat el, így nem lehet számottevő zsugorodása sem. Emiatt csak az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás okozta sajátfeszültségekkel foglalkozunk.

A betonban kialakuló hőmérsékleti feszültségek szempontjából a betonban keletkező hőmérsékleten kívül figyelembe kell venni, hogy a beton korával nő a beton húzószilárdsága és rugalmassági modulusa. Továbbá, mivel a sajátfeszültségek nem pillanatnyi terhet jelentenek, fellép a lassú alakváltozás is, és nagysága időben változó.

A vastagfalú vasbeton szerkezet feszültségállapota tehát nagyon összetett probléma. Így a gyakorlati számítási eljárások – elsősorban a vizsgált fiatal betonra vonatkozóan – közelítően veszik figyelembe számos tényezőnek a hőmérséklet okozta feszültségekre gyakorolt hatását, elsősorban ezek örökölhető jellegét. Ez indokolható a rugalmassági modulus és a lassú alakváltozás mértékének időbeli változásával.

A **kéregrepedés** fogalmát az 5.1. ábrán szemléltettjük. Az 5.1a ábra szerint a falban egyenlőtlen hőmérséklet lép fel. Mivel a beton nem alakváltozhat szabadon, ezért benne feszültségek keletkeznek. Külső erő nincs, ezért a belső erőknek (húzó-

és nyomóerő) kell egyensúlyban lenni. Úgy számíthatjuk a feszültséget, hogy az egyenlőtlen hőmérséklet ábráját területileg kiegyenlítjük. A fal szélén az ΔT hőmérsékletből húzófeszültség keletkezik, amit az

$$f_{ct} = \alpha \cdot \Delta T \cdot E_{ot}$$

egyenletből számíthatunk. A képletben

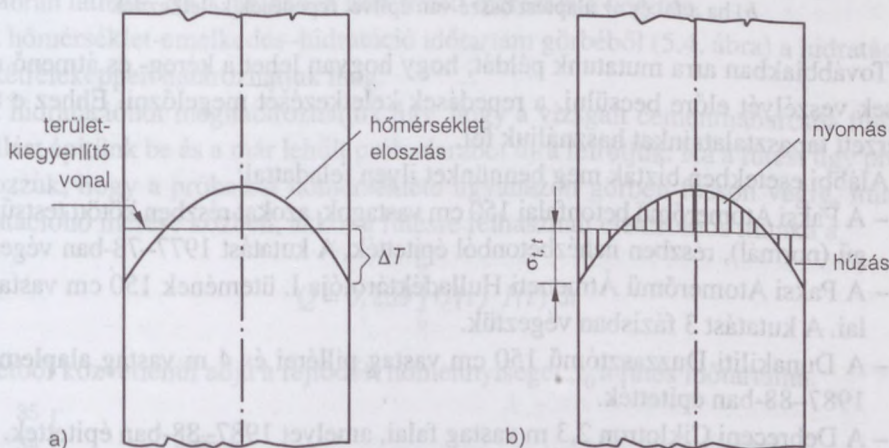
f_{ct} a központos húzószilárdság, MPa;

α a beton hőtágulási együtthatója;

ΔT a területkiegyenlítéssel nyert hőmérséklet, °C;

E_{ot} a beton kezdeti rugalmassági modulusa húzásra, MPa.

Ha a beton húzószilárdsága (f_{ct}) – a vizsgált időpontban – nagyobb $\sigma_{t, \max}$ -nál, akkor a beton megreped. Ezt nevezünk kéregrepedésnek, ami nem mély, de el kell kerülni, mert a repedések a beton (vasbeton) károsodását segítik elő.



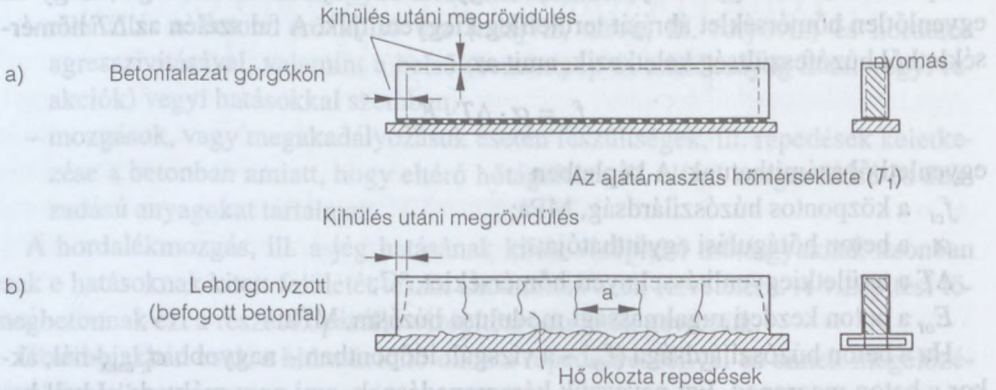
5.1. ábra. A kéregrepedés fogalma

a) egyenlőtlen hőmérséklet a falban; b) a húzó- és nyomófeszültségek

Az 5.2. ábra azt szemlélteti, hogy pl. egy hídpillér felmenő falát amikor építik, az alaptestje már lehűlt a környezet hőmérsékletére. A felmenő fal hőmérséklete – a hidratációhő hatására – nő. Ha az alaptest és a felmenőfal között golyóscsapágy volna, akkor a felmenőfal szabadon alakváltozhatna (5.2a ábra). De mivel az alaptest és a felmenőfal össze van építve, ott gátolt alakváltozás jön létre, a teljes falon átmenő repedések keletkeznek. Ezeket nevezük **átmenő repedéseknek**.

Fentiekből látható, hogy igen sokféle tényező hat: a cement mennyisége és minősége, amely a hidratációhőt meghatározza; külső tényezők: szél sebessége, léghőmérséklet, napsugárzás; a beton tulajdonságai: hőmérséklete a betonozás időpontjában, a fajhője, a hővezetési tényezője, húzószilárdsága, rugalmassági modulusa, a zsaluzat hővezetési tényezője, vastagsága, hőátadási tényezője. Ezt a sok, időben változó tényezőt kell egyidejűen számításba venni.

A fal legnagyobb közepes hőmérséklete (T_2)



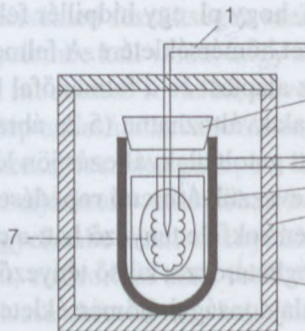
5.2. ábra. Az átmenő repedés fogalma

- a) az alaptest és a felmenőfal között golyóscsapágy van, a felmenőfal szabadon alakváltozhat;
 b) ha a fal és az alaptest össze van építve, repedések keletkeznek

Továbbiakban arra mutatunk példát, hogy hogyan lehet a kéreg- és átmenő repedések veszélyét előre becsülni, a repedések keletkezését megelőzni. Ehhez e téren szerzett tapasztalatainkat használjuk fel.

Alábbi esetekben bíztak meg bennünket ilyen feladattal:

- A Paksi Atomerőmű betonfalai 150 cm vastagok, azokat részben kötött testsűrűségű (normál), részben nehézbetonból építették. A kutatást 1977–78-ban végeztük.
- A Paksi Atomerőmű Átmeneti Hulladéktárolója I. ütemének 150 cm vastag falai. A kutatást 3 fázisban végeztük.
- A Dunakiliti Duzzasztómű 150 cm vastag pillérei és 4 m vastag alaplemezei. 1987–88-ban építették.
- A Debreceni Ciklotron 2,3 m vastag falai, amelyet 1987–88-ban építettek.
- Az M7 autópálya betonburkolata. Ez ugyan csak 24 cm vastag volt, de 48 cm vastag betonnak tekinthető, mivel hőleadás csak a levegővel érintkező felületen volt [Balázs–Liptay–Tóth–Zimonyi (1981)].



5.3. ábra. A BME Építőanyagok Tanszéken készített termoszos kaloriméter
 1 – termosz; 2 – hőszigetelt doboz; 3 – rézedény; 4 – fűtés; 5 – parafa dugó;
 6 – termoelem; 7 – minta

5.3. A hidratációhő befolyásoló tényezők

[Balázs (1987), Taylor (1969)]

5.3.1. A hidratációhő meghatározása hőáramlásos kaloriméterben

A hidratációhő meghatározásának a módszereit a 2.2.8.2. pontban ismertettük.

Kisebb méretű betonszerkezetekben a hidratációhő hatására a hőmérséklet kezdetben emelkedik, majd a maximum elérése után csökken. A maximum időpontjában a keletkezett hő és a hőveszteség azonos. A hőmérséklet ilyen alakulása olyan termoszos módszerrel közelíthető meg, amelyben a termosz és az azt körülvevő tér hőmérsékletét nem fűtjük a minta hőmérsékletére.

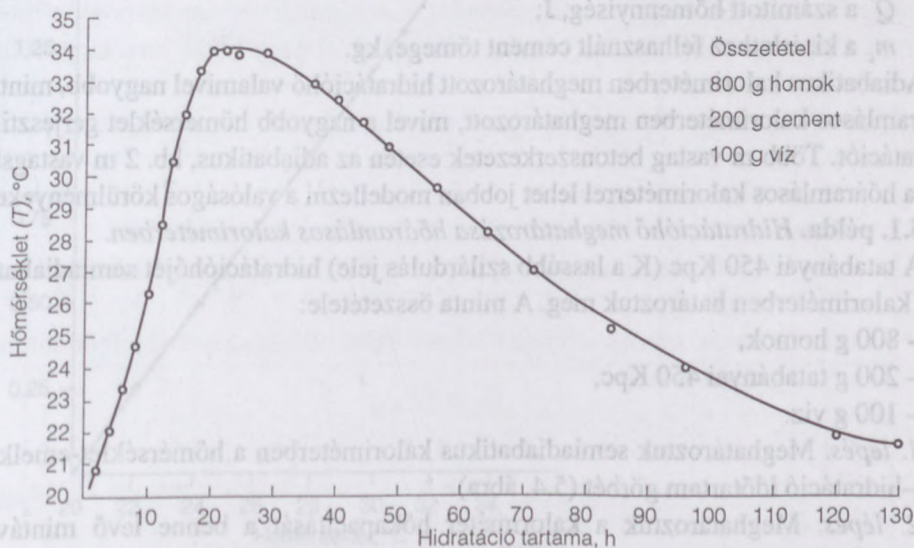
BME Építőanyagok Tanszékén Szombathy Zoltán által megépített kaloriméter a 5.3. ábrán látható. Az 1. példában ismertetett mérést is ő végezte.

A hőmérséklet-emelkedés–hidratáció időtartam görbéből (5.4. ábra) a hidratációhőt kétféleképpen határozhatjuk meg.

A hidratációhőt meghatározhatjuk úgy, hogy a vizsgált cementhabarcsba fűtőellenállást építünk be és a már lehűlt próbadarabot újra felfűtjük. Ha a fűtést úgy programozzuk, hogy a próbatest hőmérséklete ugyanazon görbén fusson végig, mint a hidratációhő mérése közben, akkor a fűtésre felhasznált elektromos munka a

$$Q = 0,239 \int_0^{t_0} U(t) \cdot I(t) dt$$

képletből közvetlenül adja a fejlődött hőmennyiséget. t_0 a fűtés időtartama.



5.4. ábra. A habarcs hőmérséklete a habarcs kora függvényében, hőáramlásos kaloriméterben. Bedolgozási hőmérséklet 20 °C

Ez az eljárás azonban lassú és nehézkes. Ezért a hőmérséklet–idő diagramból a következőképpen lehet számítani a fejlődött hőmennyiséget:

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

ahol Q_1 hőmérséklet–idő görbéből számítható hőmennyiség, J;

Q_2 a hővesztés okozta hőmennyiség, J;

c_k megadja az 1 °C-kal való melegítéshez szükséges hőmennyiséget, azaz a kaloriméter hőkapacitását. Ebből

$$Q_1 = c_k \Delta T.$$

A fűtés kikapcsolása utáni hőmérséklet-csökkenés (5.5b ábra) megadja a nem tökéletes hőszigetelés okozta hővesztéséget. Ebből megszerkeszthető a minta hőmérsékletétől függően a termosz hővesztéségi ábrája J/h-ban (5.5c ábra). Ezután a hővesztés okozta hőmennyiséget (Q_2) számítjuk ki:

$$Q_2 = \sum_{i=1}^n \Delta Q_{i,i-1} t_{i,i-1},$$

ahol c_k a készülék hőkapacitása, J/°C;

ΔQ_1 az $i, i-1$ -edik szakasz átlaghőmérsékletéhez tartozó hővesztés, J/h;

t_i az $i, i-1$ -edik szakasz hossza, h.

A hidratációhő a következő képlettel számítható:

$$q = \frac{Q_1 + Q_2}{m_c},$$

ahol q a hidratációhő, J/kg;

Q a számított hőmennyiség, J;

m_c a kísérlethez felhasznált cement tömege, kg.

Adiabatikus kaloriméterben meghatározott hidratációhő valamivel nagyobb, mint a hőáramlásos kaloriméterben meghatározott, mivel a nagyobb hőmérséklet gerjeszti a hidratációt. Több m vastag betonszerkezetek esetén az adiabatikus, kb. 2 m vastagságig a hőáramlásos kaloriméterrel lehet jobban modellezni a valóságos körülményeket.

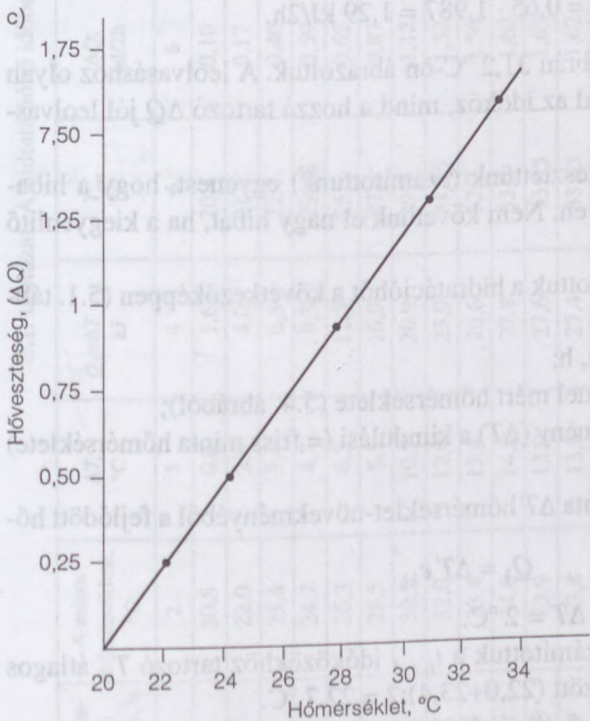
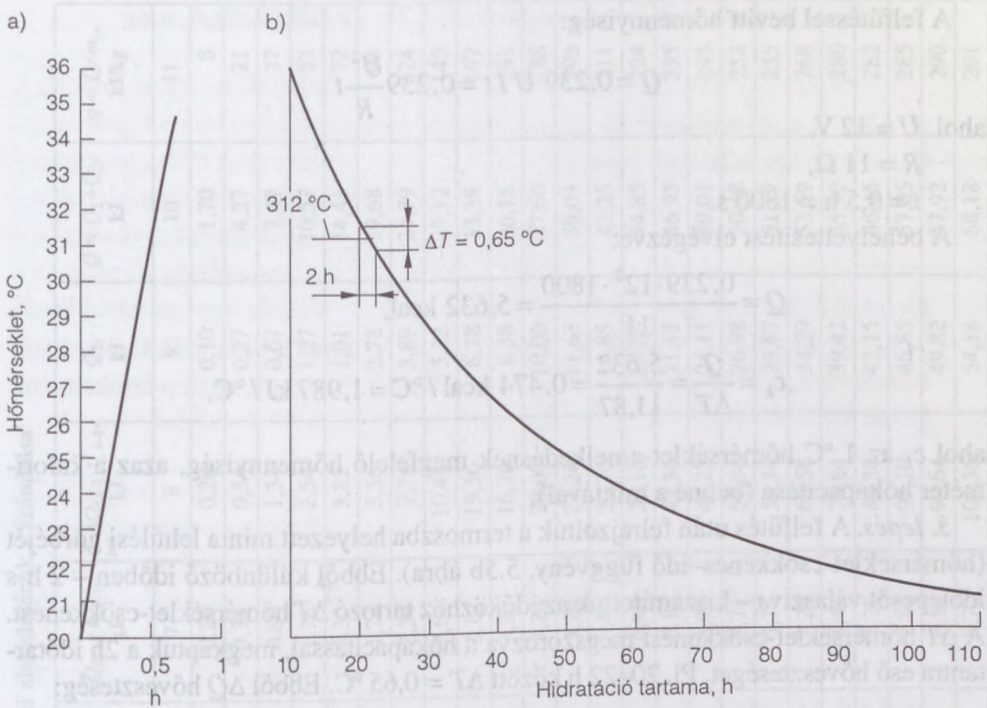
5.1. példa. Hidratációhő meghatározása hőáramlásos kaloriméterben.

A tatabányai 450 Kpc (K a lassúbb szilárdulás jele) hidratációhőjét semiadiabatikus kaloriméterben határoztuk meg. A minta összetétele:

- 800 g homok,
- 200 g tatabányai 450 Kpc,
- 100 g víz.

1. lépés. Meghatároztuk semiadiabatikus kaloriméterben a hőmérséklet-emelkedés–hidratáció időtartam görbét (5.4. ábra).

2. lépés. Meghatároztuk a kaloriméter hőkapacitását a benne levő mintával együtt. E célból, miután a minta lehűlt a környezet hőmérsékletére, akkor fűtöttük fel és kaptuk az 5.5a ábra szerinti egyenest.



5.5. ábra. Q_1 és Q_2 számításához szükséges segédgörbék

a) a felfűtési függvény; b) a lehűlési görbe; c) a hőmérséklet-hővesztés függvény

A felfűtéssel bevitt hőmennyiség:

$$Q = 0,239 U I t = 0,239 \frac{U^2}{R} t$$

ahol $U = 12 \text{ V}$,

$R = 11 \ \Omega$,

$t = 0,5 \text{ h} = 1800 \text{ s}$.

A behelyettesítést elvégezve:

$$Q = \frac{0,239 \cdot 12^2 \cdot 1800}{11} = 5,632 \text{ kcal},$$

$$c_k = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{5,632}{11,87} = 0,474 \text{ kcal}/^\circ\text{C} = 1,987 \text{ kJ}/^\circ\text{C},$$

ahol c_k az $1 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérséklet-emelkedésnek megfelelő hőmennyiség, azaz a kalóriaméter hőkapacitása (benne a mintával).

3. lépés. A felfűtés után felrajzoltuk a termoszba helyezett minta lehülési görbéjét (hőmérséklet-csökkenés-idő függvény, 5.5b ábra). Ebből különböző időben – 2 h-s időlépcsőt választva – kiszámítottuk az időközkhöz tartozó ΔT hőmérséklet-csökkenést. A ΔT hőmérséklet-csökkenést megszorozva a hőkapacitással, megkaptuk a 2h időtartamra eső hőveszteséget. Pl. 20–22 h között $\Delta T = 0,65 \text{ }^\circ\text{C}$. Ebből ΔQ hőveszteség:

$$\Delta Q = \Delta T \cdot c_k = 0,65 \cdot 1,987 = 1,29 \text{ kJ}/2\text{h}.$$

Az így kapott értéket az 5.5c ábrán $31,2 \text{ }^\circ\text{C}$ -on ábrázoltuk. A leolvasáshoz olyan léptéket kell választani, hogy mind az időköz, mind a hozzá tartozó ΔQ jól leolvasható legyen.

A mért adatok közé úgy szerkesztettünk (számítottunk) egyenest, hogy a hibahalmazok összege minimális legyen. Nem követünk el nagy hibát, ha a kiegyenlítő egyenest szemre húzzuk be.

4. lépés. Táblázatosan kiszámítottuk a hidratációhőt a következőképpen (5.1. táblázat):

- 1. oszlop a hidratáció tartama, h;
- 2. oszlop a minta termoelemmel mért hőmérséklete (5.4. ábrából);
- 3. oszlop hőmérséklet-növekmény (ΔT) a kiindulási (= friss minta hőmérséklete) hőmérséklethez képest;
- 4. oszlop Kiszámítottuk a minta ΔT hőmérséklet-növekményéből a fejlődött hőmennyiség egyik részét:

$$Q_1 = \Delta T c_k,$$

- pl. 4 órás hidratáció esetén $\Delta T = 2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 5. oszlop A 3. oszlopból kiszámítottuk a $t_i, i-1$ időközkhöz tartozó T_m átlagos hőmérsékletet pl. 4 és 6 h között $(22,0+23,4):2 = 22,7 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 6. oszlop A T_m értékekhez a 5.5c ábrából kiolvastuk a ΔQ hőveszteségeket, pl. 4 h-nál 0,17.

5.1. táblázat. A hidratacióhő időbeni alakulásának a számítása

A hidratació tartama, h	A minta hőmérséklete, °C	ΔT , °C	$Q_1 = \Delta T \cdot c_p$, kJ	T_m , °C	ΔQ_c , kJ/2h	$Q_{i,i-1} \cdot t_{i,i-1}$, kJ	$\sum_{i=1}^n \Delta Q_{i,i-1} \cdot t_{i,i-1}$, kJ	Q_2 , kJ	$Q = Q_1 + Q_2$, kJ	$q = Q/m_c$, kJ/kg
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	20,8	0,8	1,6	20,4	0,10	0,20	0,20	0,10	1,70	8
4	22,0	2,0	4,0	21,4	0,17	0,34	0,54	0,27	4,27	21
6	23,4	3,4	6,8	22,7	0,40	0,80	1,34	0,67	7,47	37
8	24,7	4,7	9,3	23,05	0,59	1,18	2,54	1,27	10,57	53
10	26,3	6,3	12,5	25,5	0,65	1,30	3,82	1,91	14,41	72
12	28,5	8,5	16,9	27,4	0,87	1,74	5,56	2,78	19,68	98
14	30,5	10,5	20,9	29,5	1,12	2,24	7,78	3,89	24,79	124
16	32,0	12,0	23,9	31,25	1,32	2,64	10,44	5,22	29,12	145
18	33,4	13,4	26,6	32,7	1,56	3,12	13,56	6,78	33,38	167
20	34,0	14,0	27,8	33,7	1,60	3,20	16,76	8,38	36,18	181
22	33,9	13,9	27,6	33,95	1,63	3,26	20,00	10,00	37,60	188
24	33,8	13,8	27,4	33,85	1,62	3,24	23,26	11,63	39,03	195
28	33,8	13,8	27,4	33,8	1,61	6,44	29,70	14,85	42,25	211
32	33,5	13,5	26,8	33,65	1,60	6,40	36,10	18,05	44,85	224
36	33,0	13,0	25,8	33,25	1,55	6,18	42,30	21,15	46,95	235
40	32,5	12,5	24,9	32,75	1,49	5,96	48,22	24,11	49,01	245
44	31,8	11,8	23,5	32,15	1,44	5,74	53,96	26,98	50,48	252
48	31,0	11,0	21,9	31,4	1,34	5,74	59,34	29,67	51,57	255
56	29,7	9,7	19,3	29,85	1,15	9,24	68,58	34,29	53,59	268
64	28,3	8,3	16,5	29,0	1,05	8,44	78,84	39,42	55,92	280
72	27,2	7,2	14,3	27,75	0,91	7,28	84,30	42,15	56,45	282
84	25,3	5,3	10,5	26,25	0,74	8,84	93,10	46,55	57,05	285
96	24,1	4,1	8,1	24,7	0,55	6,54	99,64	49,82	57,92	290
120	22,0	2,0	4,0	23,05	0,36	8,72	108,36	54,18	58,18	291

– 7. oszlop ΔQ hővesztéseket megszoroztuk a $t_{i, i-1}$ időközökkel, azaz

$$Q_{i, i-1} \cdot t_{i, i-1},$$

pl. a 2–4 h-s időközben $0,17 \cdot 2 = 0,34$ kJ.

– 8. oszlop Képeztük ezek összegét:

$$\sum_{i-1}^n \Delta Q_{i, i-1} \cdot t_{i, i-1},$$

pl. $t_i = 4$ h esetén $0,20 + 0,34 = 0,54$ kJ.

– 9. oszlop Mivel ΔQ hőmérsékletfüggvényt (5.5c ábra) 2 h-es időközökre határoztuk meg, azért a Q_2 hővesztéséget úgy kaptuk, hogy a 8. oszlop értékeit osztottuk kettővel, azaz

$$Q_2 = \frac{\sum_{i-1}^n \Delta Q_{i, i-1} \cdot t_{i, i-1}}{2},$$

pl. $t_i = 4$ h esetén $1,54 : 2 = 0,27$ kJ.

– 10. oszlop Kiszámítottuk a fejlődött hőmennyiséget:

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

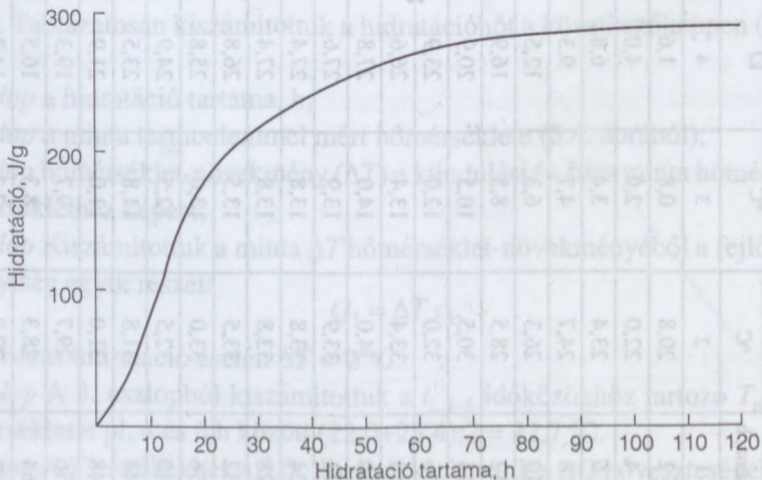
pl. $t_i = 4$ h esetén $4,0 + 0,27 = 4,27$ kJ.

– 11. oszlop Kiszámítottuk a hidratációhőt:

$$q = \frac{Q}{m_c},$$

ahol m_c a cement tömege, esetünkben 200 g. pl. $t_i = 4$ h esetén $q = \frac{4,27}{0,2}$ kJ/kg.

A hidratációhő időbeni alakulása az 5.6. ábrán látható.



5.6. ábra. A hidratációhő időbeni alakulása

5.3.2. A cement hidratációhőjét befolyásoló tényezők

A cement hidratációhőjét elsősorban következő tényezők befolyásolják:

- a cement kémiai és ásványi összetétele
 - a cement őrlési finomsága
 - a bedolgozott friss beton hőmérséklete
 - a keverővíz mennyisége
 - az adagolt adalékszerek fajtája és mennyisége.
- Továbbiakban ezek várható hatását szemléltetjük.

5.3.2.1. A cement kémiai és ásványi összetételének hatása

Mielőtt gyári cementjeink hidratációhőjével foglalkoznánk, összefoglalunk néhány idevágó korábbi eredményt.

Verbeck és Foster (1950) az amerikai (USA) portlandcementek 5 alaptípusának a hidratációhőjét vizsgálta 3 napos és 6,5 éves kor között. Ezek tiszta portlandcementek voltak és a hidratációhő oldáshőméréssel határozták meg. Az 5.2. táblázatban megadtuk azt is, hogy kb. melyik hazai gyári cementnek feleltek meg. A táblázatból látható a cement C_3A -tartalmának a hidratációhőre kifejtett nagy hatása. Ugyanis az I típusú cement C_3A -tartalma 12–15 m%, a III típusúé 6–8 m%, az V típusúé pedig kb. 0 m%.

5.2. táblázat. Különböző amerikai portlandcementek hidratációhője

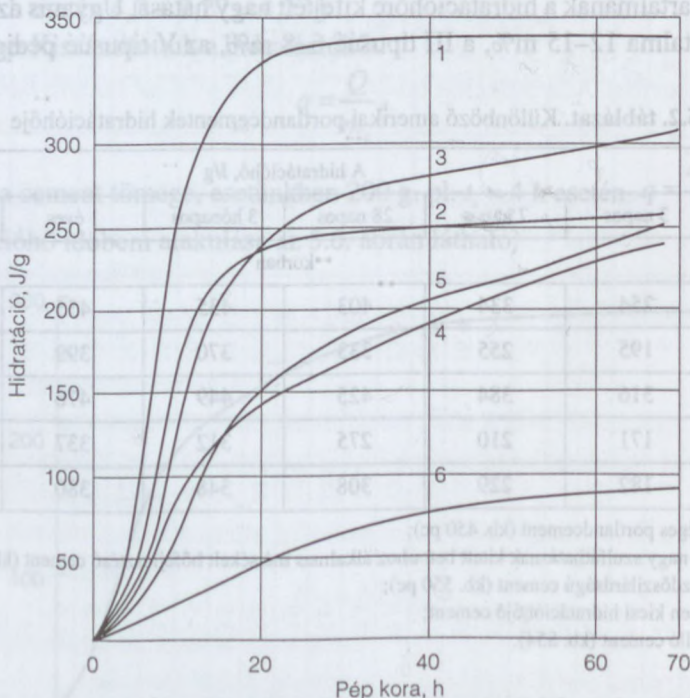
Cement típus	A hidratációhő, J/g					
	3 napos	7 napos	28 napos	3 hónapos	1 éves	6,5 éves
	korban					
I	254	334	403	435	455	490
II	195	255	333	370	399	411
III	316	384	425	449	476	507
IV	171	210	275	312	337	357
V	182	229	308	348	380	394

- I. típus: közönséges portlandcement (kb. 450 pc);
 II. típus: nem túl nagy szulfáthatásnak kitett betonhoz alkalmas mérsékelt hőfejlesztő cement (kb. S100);
 III. típus: nagy kezdőszilárdságú cement (kb. 550 pc);
 IV. típus: különösen kicsi hidratációhőjű cement;
 V. típus: szulfátálló cement (kb. S54).

Az 5.3. táblázatban feltüntetett ásványi összetételű cementek termoszos kalóriaméterben meghatározott hidratációhője időbeli alakulását – kb. 3 napos korig – az 5.7. ábrán foglaltuk össze.

5.3. táblázat. A cementek ásványi összetétele és szabványos szilárdsága

Tulajdonság		Váci 450 pc	Tatabányai 450 kpc	Osztrák		Svéd nagy kezdőszil.	Belit- cement
				PZ 375	PZ 475		
Jele az 5.7. ábrán		4	5	2	1	3	6
C ₃ S, m%		52,0	50,5	43,5	43,9	54,5	30,27
C ₂ S, m%		17,5	20,5	25,9	25,8	15,1	43,58
C ₃ A, m%		12,5	11,8	12,5	14,7	13,5	–
C ₄ AF, m%		4,9	8,6	6,1	6,5	6,2	16,39
Fajlagos felület Blaine szerint, m ² /kg		345	266	396	549	389	250
Nyomószilárdság, MPa	1 napos	8,5	–	13,8	25,6	12,1	–
	2 napos	17,8	–	23,6	37,1	22,8	–
	7 napos	43,0	–	38,2	48,6	44,9	7,3
	28 napos	59,7	–	52,3	55,2	57,4	12,7
Hajlító-húzó szilárdság, MPa	1 napos	1,69	–	3,00	5,30	1,86	–
	2 napos	3,49	–	5,30	6,48	3,68	–
	7 napos	8,71	–	7,50	7,93	7,25	22,7
	28 napos	10,55	–	8,83	9,02	9,07	39,8



5.7. ábra. Tiszta portlandcementek hidratációhőjének időbeni alakulása a kezdeti időszakban.
Jelölés: 1 – PZ 475; 2 – PZ 375; 3 – svéd pc; 4 – váci 450 pc; 5 – tatabányai 450 Kpc;
6 – belitcement; bedolgozási hőmérséklet 20 °C

Az 5.3. táblázat azt mutatja, hogy a 3 jelű svéd cement csak ásványi összetételében tér el a 4 és 5 jelű magyar cementektől. A 2 és 5 jelű osztrák pc azonos ásványi összetételű, de az 1 jelűnek lényegesen nagyobb a fajlagos felülete, mint a 2 jelűé. Az 1–5 jelű cementeket a győri szabadkonzolos hidépítés előkísérletei során vizsgáltuk. A 6 jelű cement belit típusú portlandcement, amelyet a nagymarosi vízlépcső betontechnológiai munkáihoz a SZIKKTI kísérletezett ki.

A létesítendő dunai vízlépcső betontechnológiájának az előkészítésével kapcsolatban vizsgáltuk a hidraulikus pótlékok (kohósalak, trasz, savanyú pernye) hidratációhőre kifejtett hatását. A kis hidratációhőjű cementet kerestük. A vizsgált cementek összetételét az 5.4. táblázatban foglaltuk össze.

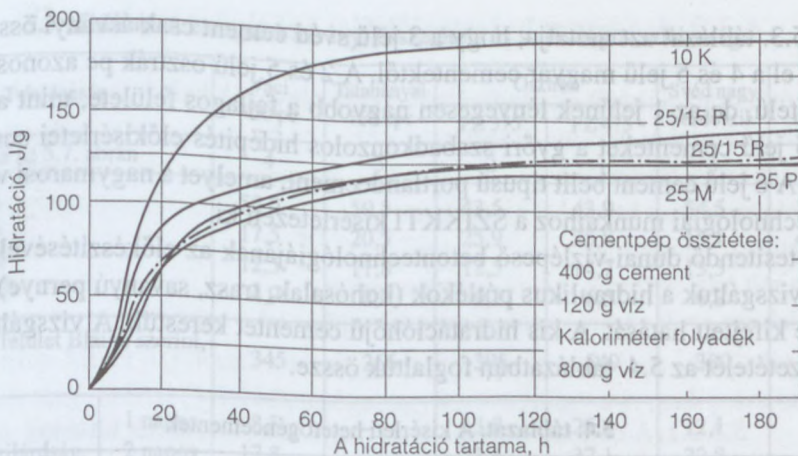
5.4. táblázat. A kísérleti heterogéncementek

Cement jele	Klinker tartalom, m%	Fajlagos felület Blaine szerint, m ² /kg	Salak, m%	Puccolán, m%
10 K	86	288	10	–
40 K	56	261	40	–
25 M	71	250	–	25 mogyoródi trasz
25 R	71	362	–	25 rátkai trasz
25 P	71	260	–	25 tatabányai pernye
25/15 M	56	268	25	25 tatabányai pernye + 15 mogyoródi trasz
25/15 R	56	349	25	25 tatabányai pernye + 15 rátkai trasz

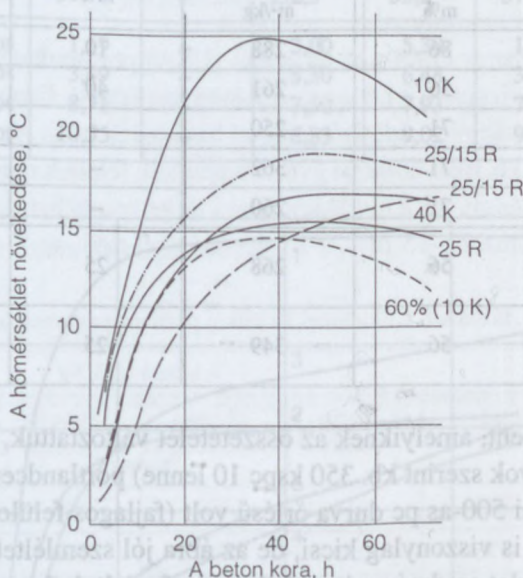
Az alapcement, amelyiknek az összetételét változtattuk, tatabányai 500-as (a későbbi szabványok szerint kb. 350 kspc 10 lenne) portlandcement volt.

A tatabányai 500-as pc durva őrlésű volt (fajlagos felülete kb. 250 m²/g), ezért a hidratációhője is viszonylag kicsi, de az ábra jól szemlélteti a hidraulikus pótlékok hatását. A kísérlet eredményeit az 5.8. ábrán foglaltuk össze.

Megvizsgáltuk a hőmérséklet-emelkedést 1 m³-es betonkockában is. A kocka zsaluzata: 24 mm külső felületén lakkozott deszka, 50 mm faforgácslap, 24 mm belső felületén lakkozott deszka, 1 rétegű műanyag fólia, 1 rétegű bitumenes csupaszkmez. Ezen belül volt a beton. A 300 kg/m³ cementtartalmú beton közepe hőmérsékletének időbeni alakulása az 5.9. ábrán látható. A 200 kg/m³ cementtartalmú beton maximális hőmérsékletemelkedése kb. 2/3-a volt a 300 kg/m³ cementtartalmú betonénak, tehát a hőfejlődés arányos volt a cementtartalommal. A betonkockában mért legnagyobb hőmérsékletből számított hidratációhő (a hőveszteség tekintetbe vétele nélkül), közel azonos volt a termoszos módszerrel meghatározott azonos korú pép hidratációhőjével. Ugyanakkor az adiabatikus kaloriméterben meghatározott hidratációhő ennél nagyobb volt.



5.8. ábra. A hidraulikus pótlékok mennyiségének és fajtájának a hatása a hidratációhőre



5.9. ábra. Heterogén portlandcementek hidratációhője. Hőmérséklet-emelkedés a 300 kg/m³ cementtartalmú betonkockában [Balázs–Erdélyi–Horváth–Opotzky–Zimonyi (1968)]

5.5. táblázat. A klinkerásványok hidratációhője

Klinker- ásvány	A hidratációhő, J/g			
	3	7	28	90
	napos korban			
C ₃ S	400	455	485	518
C ₂ S	21	100	167	183
C ₃ A	614	655	870	920
C ₄ AF	92	250	376	413

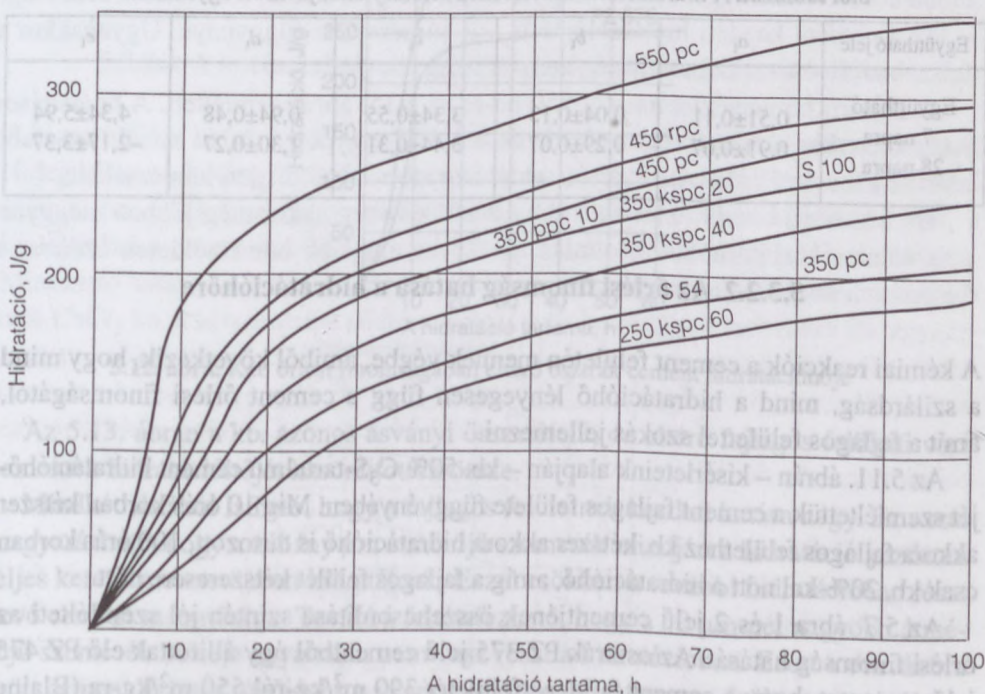
Az ásványi összetétellel, ill. a cementfajtaival kapcsolatos kísérletek eredményeiből az alábbi következtetést vonjuk le:

Azonos fajlagos felületű cementek hidratációhője kémiai, ill. ásványi összetételüktől függ. Tájékoztatásul az 5.5. táblázatban megadtuk az egyes klinkerásványok hidratációhőjének időbeni alakulását. Annál nagyobb a kezdeti hidratációhő, minél több a cementben a C_3S (trikalcium-szilikát) és C_3A (trikalcium-aluminát) (5.7. ábra 3 jelű görbe). Az S54 jelű cementnek azért kicsi a hidratációhője, mert nincs benne C_3A (5.2. táblázat V típusú pc). A belittípusú cementé (5.7. ábra 6 jelű görbe) azért kicsi, mert sok benne a βC_2S (béta-dikalcium-szilikát).

A heterogén portlandcementek hidratációhője mindig kisebb, mint azoké a tiszta portlandcementeké, amelyeknek az ásványi összetétele közel azonos. Éspedig ahány % traszt tartalmaz a pc, annyi %-kal csökken hidratációhője (a kezdeti időszakban). Jó közelítéssel igaz ez a savanyú pernyére is. Ugyanis ezek úgy vesznek részt a hidratációban, hogy a bennük lévő aktív kovásvav reakcióba lép a cementből felszabaduló $Ca(OH)_2$ -dal. Ehhez a folyamathoz azonban időre van szükség.

A kohósalak gerjesztő anyagok jelenlétében önmagában is szilárdulni képes, de lassan. A cement kohósalaktartalma a cement βC_2S -tartalmához hasonlítható. Mindkettő késlelteti a kezdeti hidratációhőt.

A hidratációhő elleni védekezés, ill. hasznosítása szempontjából azonban az érdekel elsősorban bennünket, hogy gyári cementjeinknek mennyi a hidratációhője.



5.10. ábra. Szabványos cementjeink hidratációhője 20 °C hőmérsékleten

Nem szabad azonban figyelmen kívül hagyni, hogy az 5.10. ábrán feltüntetett görbék átlaggörbéknek tekinthetők csak, mivel a szabványos cementjeink kémiai és ásványi összetétele, valamint fajlagos felülete tág határok között ingadozhat. De ingadozhat a hidraulikus pótlék mennyisége (pl. kspc 40 azt jelenti, hogy a kohósalaktartalom 20–40% közötti) és minősége is. Ha tehát megbízható adatokat szeretnénk kapni, akkor felhasználás előtt a hidratációhőt célszerű megmérni.

A cementek hidratációhője a klinkeralkotók entalpiájából adódik össze. Ezért több kutató megkísérelte a tiszta portlandcement hidratációhőjét az ásványi összetételből és a klinkerásványok hidratációhőjéből kiszámítani. A klinkerásványok hidratációhőjére Woods–Steinour–Starke, Verbeck és Foster (1950), Szimeonov (1959), Mandry és mások adtak meg értékeket.

Tiszta portlandcementek hidratációhője az egyes klinkerásványok hidratációhője és a cement ásványi összetétele alapján Mandry szerint a következőképpen számítható:

$$q_t = a_t C_3S + b_t \beta C_2S + c_t C_3S + d_t C_4AF + e_t SO_3,$$

ahol q_t a cement hidratációhője t napos korban, a_t , b_t , c_t , d_t és e_t empirikus együtthatók (5.6. táblázat). A potenciális klinkerösszetétel alapján számított hidratációhő hibájául róják fel, hogy a Bogue (1955) szerint számított összetétel elsősorban akkor közelíti meg a valóságot, ha a C_3A mennyisége kicsi.

5.6. táblázat. A hidratációhő becsléséhez Mandry által javasolt együttható

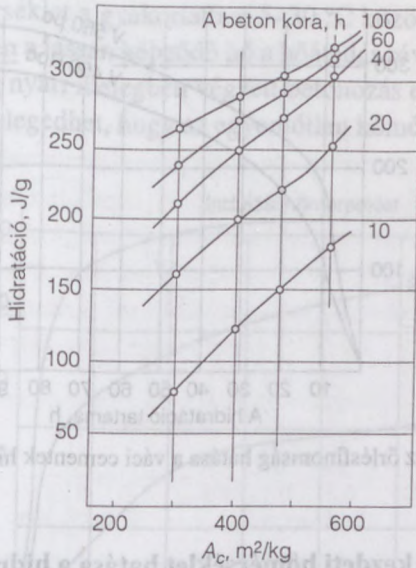
Együttható jele	a_t	b_t	c_t	d_t	e_t
Együttható					
7 napra	0,51±0,11	0,04±0,13	3,34±0,55	0,94±0,48	4,34±5,94
28 napra	0,91±0,07	0,29±0,07	3,44±0,31	1,30±0,27	-2,17±3,37

5.3.2.2. Az őrlési finomság hatása a hidratációhőre

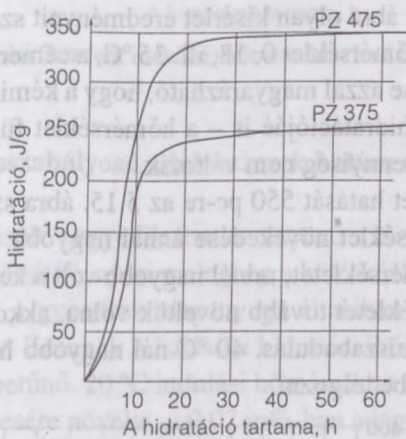
A kémiai reakciók a cement felületén mennek végbe, amiből következik, hogy mind a szilárdság, mind a hidratációhő lényegesen függ a cement őrlési finomságától, amit a fajlagos felülettel szokás jellemezni.

Az 5.11. ábrán – kísérleteink alapján – kb. 50% C_3S -tartalmú cement hidratációhőjét szemléltettük a cement fajlagos felülete függvényében. Míg 10 órás korban kétszer akkora fajlagos felülethez kb. kétszer akkora hidratációhő is tartozott, 100 órás korban csak kb. 20%-kal nőtt a hidratációhő, amíg a fajlagos felület kétszeresére nőtt.

Az 5.7. ábra 1 és 2 jelű cementjének összehasonlítása szintén jól szemlélteti az őrlési finomság hatását. Az osztrák PZ 375 jelű cementből úgy állítottak elő PZ 475 jelű cementet, hogy a cement fajlagos felületét 390 m²/kg-ról 550 m²/kg-ra (Blaine szerint) növelték (5.12. ábra).



5.11. ábra. A cement őrlési finomságának a hatása a hidratációhőre [Balázs–Borján–Borosné–Liptay–Zimonyi (1974)]

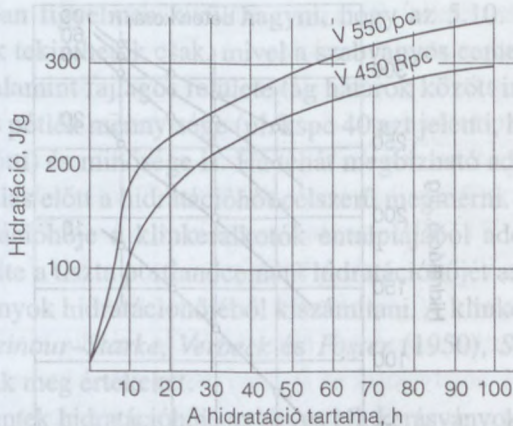


5.12. ábra. Két, őrlési finomságában eltérő osztrák cement hidratációhője

Az 5.13. ábrán a kb. azonos ásványi összetételű, de eltérő fajlagos felületű váci cementek hidratációhőjét hasonlítottuk össze.

Mindkét ábrából látható, hogy a fajlagos felületnek kezdeti hatása nagy. Ez azzal magyarázható, hogy a néhány μm átmérőjű szemcsék mindjárt a hidratáció kezdetén teljes keresztmetszetükben hidratálódnak. Ezzel csökken a további hidratációban részt vevő cement mennyisége. Továbbá feltételezhető, hogy a $30 \mu\text{m}$ -nél nagyobb átmérőjű szemcsék belseje egyáltalán nem vesz részt a hidratációban. Ezért a durvábbra őrlött cement hidratációhőjének a végértéke is kisebb a finomra őrlött cementénél.

Valamennyi vizsgálat során az indulási hőmérséklet kb. 20°C volt.



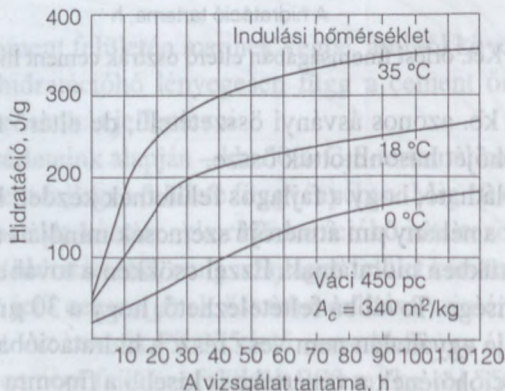
5.13. ábra. Az őrlésfinomság hatása a váci cementek hidratációhőjére

5.3.2.3. A kezdeti hőmérséklet hatása a hidratációhőre

Kezdeti hőmérsékleten a frissbeton hőmérsékletét értjük, amely hazánkban 5–30 °C között változik. Az 5.14. ábra olyan kísérlet eredményeit szemlélteti, amely során a kezdeti és a környezeti hőmérséklet 0, 18, ill. 35 °C, a cement 450 pc volt. A hidratációhő hőmérsékletfüggése azzal magyarázható, hogy a kémiai folyamatok sebessége – így a cement kezdeti hidratációjaé is – a hőmérséklet függvénye. Ugyanakkor a felszabaduló összes hőmennyiség nem változik.

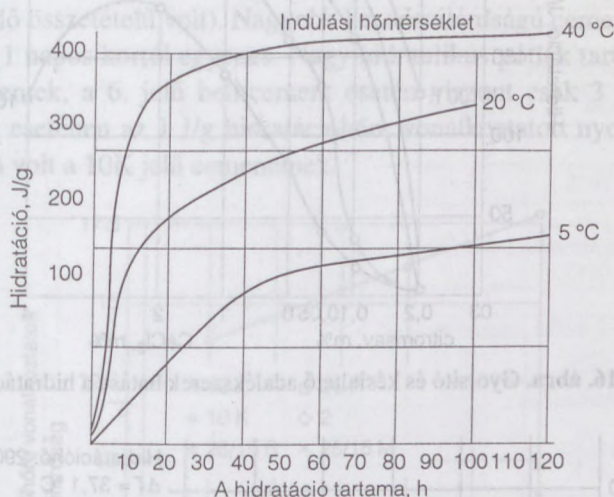
A kezdeti hőmérséklet hatását 550 pc-re az 5.15. ábra szemlélteti. A hőátadásos kaloriméterben a hőmérséklet növekedése annál nagyobb volt, és annál hamarabb elértük a maximális hőmérsékletet, minél nagyobb volt a kezdeti hőmérséklet.

Ha a kezdeti hőmérsékletet tovább növeltük volna, akkor még jobban meggyorsult volna a kezdeti hőfelszabadulás. 40 °C-nál nagyobb hőmérsékleten azonban a betont már nem lehetett bedolgozni.



5.14. ábra. A kezdeti hőmérséklet hatása 450 pc hidratációhőjére

A betonozási hőmérséklet a gyakorlatban 5–30 °C között változik. Hideg időben végzett betonozás esetén a lassan képződő hő a hőátadás révén – vékony elemek esetében – eltávozhat, míg nyári melegben végzett betonozás esetén a vastagabb betonszerkezet annyira felmelegedhet, hogy az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás miatt repedések keletkezhetnek.



5.15. ábra. A bedolgozási (kezdeti, indulási) hőmérséklet hatása 550 pc hidratációhőjére

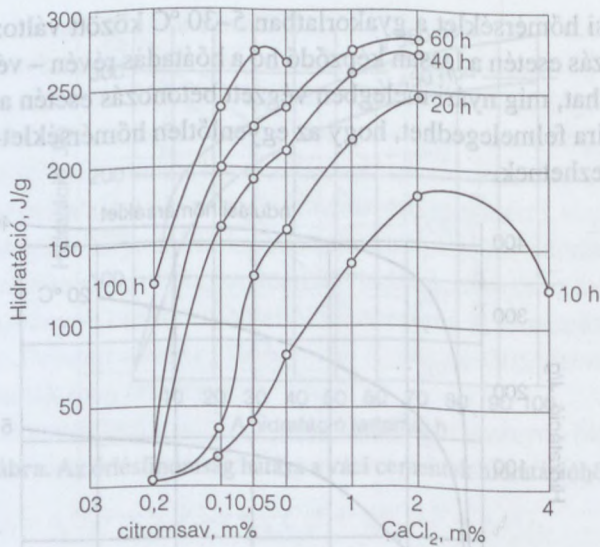
5.3.2.4. A kötőszabályozó adalékszerek hatása a hidratációhőre

A hidratációhőt befolyásoló negyedik fontos tényező a kötőszabályozó adalékszer. Hideg időben a kötőgyorsítók, nyári melegben a kötőkésleltetők használata vehető számításba. Hazánkban a gyorsítók alapanyaga általában a kalcium-klorid volt, a késleltetőké a citromsav. Ezeknek a hatása a hidratációhőre az 5.16. ábrán látható. Mindkettő hatása szembetűnő. 20 °C indulási hőmérséklet esetén 10 órás korban 1,5 m% CaCl_2 kb. a kétszeresére növelte, a 0,07 m%-ban adagolt citromsav kb. egyharmadára csökkentette a cement hidratációhőjét. A nagy mennyiségben adagolt citromsav a kötést meggátolja. A nagy mennyiségű kalcium-klorid gyorskötést okoz, és már szintén gátolja a hidratációhő kialakulását.

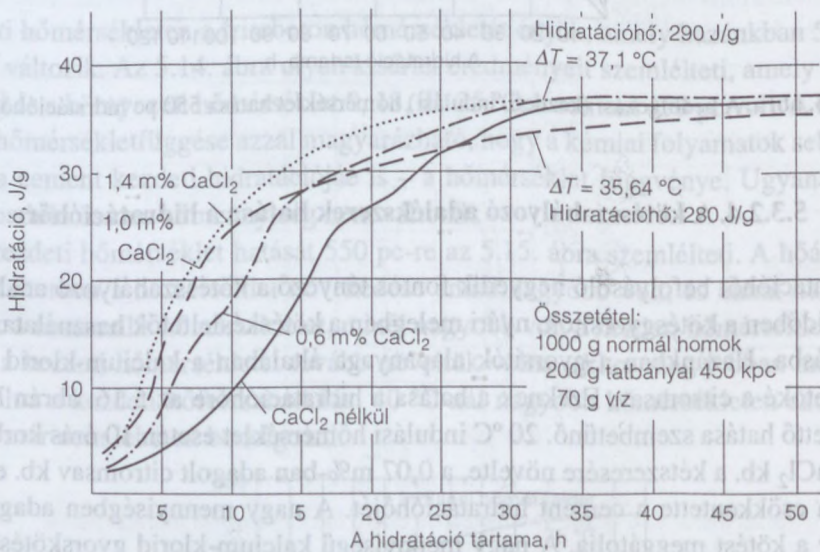
Egy másik kísérlet során adiabatikus kaloriméterben vizsgáltuk a kalcium-klorid hatását.

A cement tatabányai 600 pc, a cement: víz: normálhomok aránya 1:0,35:5 volt. Az 5.17. ábra szerint a cementre vonatkoztatott 0,6 m% vízmentes CaCl_2 már lényegesen megnövelte a kezdeti hidratációhőt, de 1,0 és 1,4 m% CaCl_2 hatása között már csak kis különbség volt. A kalcium-klorid a hidratációhő 50 órás értékét már alig befolyásolta.

Tehát a kalcium-klorid csak a hidratációhő keletkezésének kezdeti szakaszát gyorsította meg, végértékét nem befolyásolta.



5.16. ábra. Gyorsító és késleltető adalékszerek hatása a hidratációhőre



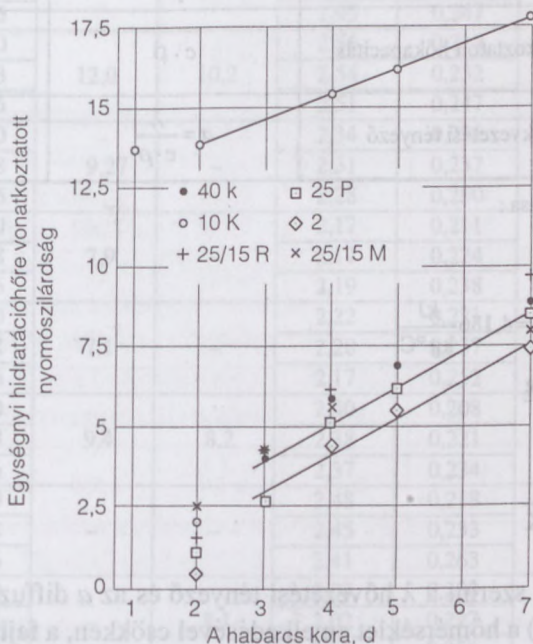
5.17. ábra. A CaCl₂ hatása a hidratációhő időbeni alakulására. Tatabányai 450 Kpc

5.3.2.5. A víz-cement tényező hatása a hidratációhőre

Schwiete és munkatársai a víz-cement tényező hatását vizsgálva megállapították, hogy annál kisebb a hidratációhő végértéke, minél kisebb a víz-cement tényező. 1 napos korrig azonban nem észleltek lényeges különbséget. Tehát a kezdőszilárdság szempontjából fontos kezdeti időszakban a víz-cement tényező szerepe elhanyagolható.

5.3.2.6. A cementek hidratációhője és a cementhabarcs szilárdsága közötti összefüggés

Az 5.4. táblázatban ismertetett cementekkel megvizsgáltuk (5.18. ábra) az 1 J/g hidratációhőre vonatkoztatott nyomószilárdságot (a habarcs a képlékeny habarcsviszogatnak megfelelő összetételű volt). Nagyobb kezdőszilárdságú cementek esetén az összefüggés már 1 napos kortól egyenes. Nagy hidraulikus pótlék tartalmú, heterogén portlandcementek, a 6. jelű belitcement esetén viszont csak 3 napos kortól. Utóbbi cementek esetében az 1 J/g hidratációhőre vonatkoztatott nyomószilárdság csak 1/4-e – 1/6-a volt a 10K jelű cementének.



5.18. ábra. Egységnyi hidratációhőre vonatkoztatott nyomószilárdság időbeli alakulása

5.4. A tömegbetonok hőtechnikai vizsgálata

5.4.1. A tömegbetonok hőtechnikai jellemzői

A tömegbetonokban kialakuló belső feszültségek szempontjából fontos hőtechnikai jellemzőket az 5.7. táblázatban foglaltuk össze.

1955-ben az V. Párizsi Nagy Gátak Konferencián megalakult egy munkabizottság (22 országból 42 tag), amely a gátak hőtani tulajdonságainak kérdésével is foglalkozott, és munkájáról a VI. Nagy Gátak Kongresszusán számolt be. A tagországokban

épült gátak adatait teljesen egységes szempontok szerint gyűjtötték össze. Azért, hogy a hőtechnikai jellemzők nagyságrendjéről tájékozódást nyújtsunk, néhány gát adatát az 5.8. táblázatban foglaltuk össze.

5.7. táblázat. A tömegbetonok hőtechnikai jellemzőinek jelölése és mértékegysége

Hőtechnikai jellemző	Jele	Mértékegysége
Hőtágulási együttható (lineáris)	α	$1/^\circ\text{C}(1/\text{K})$
Hővezetési tényező	λ	$\text{W}/(\text{mK})$
Fajhő	c	W/m
Sűrűség	ρ	kg/m^3
Egységtérfogatra vonatkoztatott hőkapacitás	$c \cdot \rho$	$\frac{\text{W} \cdot \text{kg}}{\text{m}^3}$
Diffúziós tényező, hőfokvezetési tényező	$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

A mértékegység átszámítása :

$$\lambda \frac{\text{kcal} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}} = 1,16 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

$$c \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}} = 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} = 4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$\text{hőmennyiség } 1 \text{ J} = \frac{\text{m}^2 \text{ kg}}{\text{s}^2}$$

$$1 \text{ kcal} = 4,186 \text{ kJ}$$

$$\text{hőátadási tényező} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

A táblázat adatai szerint a λ hővezetési tényező és az a diffuzivitás (hőmérséklet-vezetési tényező) a hőmérséklet emelkedésével csökken, a fajhő nő. Az 5.9. táblázat szerint a beton hőtechnikai jellemzőit döntően az adalékanyag fajtája befolyásolja, azonban nem minden tényezőt egyformán. A beton hővezetési tényezője [Missanard (1965)] 180 napos korig a 3 hónaposéhoz viszonyítva csak 4%-kal változott (nőtt). A beton hőtechnikai jellemzői kismértékben függenek a cement minőségétől és mennyiségétől, a beton nedvességtartalmától, lényegesen befolyásolja azokat a beton testsűrűsége, ami azonban a vízépítési betonoknál szűk határok között változik.

5.4.2. A betonban keletkező hőmérséklet közelítő számítása

A betonban akkor keletkeznek feszültségek, ha hőmérséklet-különbségek lépnek fel. Ehhez ismerni kell a legnagyobb hőmérsékletet és a hőmérsékletesést.

5.8. táblázat. Gátak hőtechnikai adatai

Gát neve	T, °C	$\alpha \cdot 10^6$	1/°C	k	c	ρ	diff. a
		d_{\max}	mm				
		40	112				
Hoover	10	9,5	8,6	2,53	0,212	2499	0,0047
	38			2,48	0,225		44
	66			2,46	0,251		39
Grand Coulee	10	7,9	8,3	1,61	0,219	2533	29
	38			1,61	0,231		27
	66			1,61	0,257		25
Shasta	10	-	8,6	1,96	0,219	2509	36
	38			1,96	0,233		33
	66			1,95	0,247		32
Hungry Horse	10	12,0	10,2	2,56	0,217	2405	49
	38			2,54	0,232		46
	66			2,51	0,247		43
Monti Cello	10	9,27	-	2,34	0,225	2453	43
	38			2,31	0,237		40
	66			2,28	0,250		37
Nimbus	10	7,9	-	2,17	0,211	2522	41
	38			2,17	0,224		38
	66			2,19	0,238		36
Angostura	10	7,1	-	2,22	0,221	2422	42
	38			2,20	0,237		38
	66			2,17	0,252		35
Kortes	10	9,4	8,2	2,40	0,208	2432	46
	38			2,38	0,221		44
	66			2,37	0,234		41
Gibron	10	-	-	2,48	0,218	2486	46
	38			2,45	0,233		42
	66			2,41	0,263		37
Owyhee	10	-	8,1	2,03	0,208	2436	40
	38			2,02	0,227		37
	66			2,00	0,258		32
Friant	10	-	-	1,83	0,216	2464	0,0034
	38			1,83	0,230		33
	66			1,84	0,243		31
Canyon Ferry	10	11,3	9,4	2,43	0,214	2424	47
	38			2,40	0,224		44
	66			2,37	0,235		42
Altus	10	-	-	2,35	0,225	2398	44
	38			2,35	0,236		42
	66			2,35	0,248		40
Davis	10	10,4	9,5	2,40	0,222	2414	45
	38			2,38	0,236		42
	66			2,35	0,248		39
Seminol	10	-	-	2,96	0,204	2488	58
	38			2,89	0,226		51
	66			2,81	0,245		46

5.9. táblázat. Adalékanyagok hőtani tulajdonságai (T = 21 °C-on)

Fajta	Hol alkalmazták	$\alpha \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$	k	ϵ	ρ	a	A tengely-irányhoz viszonyítva
Kvarc	Buffalo Park	13,4	4,45	0,175	2,53	0,00964	
Kvarc	Buffalo Park	10,2					⊥
Gránit	Hoover Clear Creek	–	2,50	0,171	–	–	
		–	2,65	0,188	–	–	
Dolomit	Norris Norris	–	3,70	0,192	–	–	
		–	3,54	0,200	–	–	
Mészke	Hoover Bridge	–	–	0,179	–	–	
	Canyon	3,96	2,78	0,202	2,704	0,00509	
	Angostura	3,94	2,29	0,188	2,669	0,00457	
Bazalt	Hoover Grand Coulee	–	–	0,183	–	–	
		5,83	1,47	0,204	2,695	0,00267	
Márvány	Georgia	-1,57 +4,41	– 2,11	– 0,209	– 2,704	– 0,00374	
Földpát		16,7	2,00	0,194	2,555	0,00405	 ⊥
		0,882					

5.4.2.1. A legnagyobb hőmérséklet meghatározására szolgáló közelítő képletek

Goszt 4800-49 VII. része szerint (Szimeonov, 1959) a beton hidratációhő miatti – a beépítési betonhőmérsékletéhez viszonyított – hőmérséklet-emelkedése (ΔT), ha feltételezzük, hogy a rendszerből nem távozik el hő, kétféleképpen határozható meg:

a) adiabatikus kaloriméterben,

$$b) \Delta T = \frac{q}{0,25 \left(1 + h + k + \frac{v}{c} \right)} \text{ (} ^\circ\text{C)},$$

közelítő, vagy

$$\Delta T = \frac{q}{c_c + c_h \cdot h + c_k \cdot k + \frac{v}{c}} \text{ (} ^\circ\text{C)}$$

pontos képlettel. A képletekben

q a cement hidratációhője (kal/g),

c_c, c_h, c_k a cement, a homok, illetve a kavics fajhője,

h a homok mennyisége, vonatkoztatva 1 g cementre,

k a kavics mennyisége, vonatkoztatva 1 g cementre,

v/c a víz–cement tényező.

Megjegyezzük, hogy akkor kapunk az adiabatikus kalorimeterben mérve jó értéket, ha abba a frissbeton összetételének megfelelő betont helyezünk el és mérjük a hőmérséklet-emelkedést.

Hasonlóan az adiabatikus körülményekre vonatkozik *Hampe* (1942) képlete:

$$\Delta T = \frac{C \cdot q}{\rho \cdot c_b},$$

ahol C a beton cementtartalma, kg/m^3 ,

q a cement hidratációhője, kal/g, n nap múlva,

ρ a beton testsűrűsége,

c_b a beton fajhője, kkal/kg °C.

Vischers (1964) és *Derron* (1959) ugyanezt a képletet javasolta. A q hidratációhőt adiabatikus körülmények között mérve értik.

A további képletek már azt is figyelembe veszik, hogy a beton építése során az adiabatikus állapot még a beton belsejében sem alakulhat ki.

Efremov a következő tapasztalati képletet ajánlja:

$$\Delta T = k \cdot q \cdot r \cdot C,$$

ahol ΔT max. hőmérséklet-emelkedés a betonban (°C),

k együttható, közelítő értéke 0,011,

C a beton cementtartalma, kg/m^3 -ben,

r a betonozás sebessége, m/óra-ban,

q a cement hidratációhője, kal/g-ban 7 napos korban.

Nem szerepel közvetlenül a képletben a víz–cement tényező, az adalékanyag fajhője, a léghőmérséklet stb. Hatásukat közvetve k állandó tartalmazza.

Szimeonov (1959) a

$$\Delta T = \frac{q \cdot C \cdot z}{k_1 \left(h + k + \frac{V}{C} \right)}$$

képletet javasolja, ahol

ΔT a hőmérsékletnövekedés várható értéke,

q a cement 7 napos hidratációhője, kal/g-ban,

C cementtartalom, V a víztartalom, kg/m^3 -ben,

z a betonozás sebessége, m/nap-ban,

k_1 állandó értéke 14,

h a homok mennyisége kg-ban 1 kg cementre számítva,

k a durva adalék mennyisége kg-ban 1 kg cementre számítva.

Ez a képlet arra az esetre érvényes, amikor 2 m magas rétegekben betonoznak.

5.2. Példa. A betonalkotók, illetve a beton jellemzői:

Betonösszetétel: 250 kg/m³ heterogén portlandcement,

0,5 víz–cement tényező

525 kg/m³ homok,

1600 kg/m³ durva adalékanyag,

2500 kg/m³ testsűrűség.

Fajhő: cementé 0,2 kkal/kg °C,

vízé 1 kkal/kg °C,

homoké (kvarc) 0,175 kkal/kg °C,

durva adaléké (bazalt) 0,200 kkal/kg °C,

betoné 0,230 kkal/kg °C.

A cement hidratációhője 7 napos korban 70 kal/g.

Goszt pontos képlete szerint:

$$\Delta T = \frac{70}{0,2 + 0,175 \cdot \frac{525}{250} + 0,200 \cdot \frac{1600}{250} + 0,5} = 29,8 \text{ °C}$$

Goszt közelítő képlete szerint:

$$\Delta T = \frac{70}{0,25 \left(1 + \frac{525}{250} + \frac{1600}{250} + 0,5 \right)} = 28 \text{ °C}$$

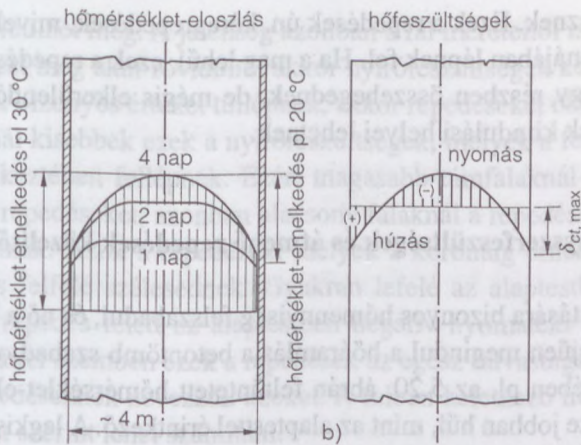
Hampe képlete szerint:

$$\Delta T = \frac{250 \cdot 70}{2500 \cdot 0,230} = 30,2 \text{ °C}$$

5.4.2.2. Kéregrepedések veszélyének közelítő számítása

[Wischers, (1964)]

Az 5.19a ábrán 4 mm vastag, deszkával zsaluzott betonfal hidratációhőből származó hőmérsékletének az alakulását tüntettük fel az első négy napban. A hidratációhő alakulása következtében a beton hőmérséklete emelkedett. A széleken azonban lassúbb lett az emelkedés, mint középen, mivel a beton a szélein állandóan hűlt. Példánkban a hőmérséklet 4 nap múlva érte el maximumát. Ez idő alatt a közép hőmérséklete 30 °C-kal, a széleké 10 °C-kal emelkedett. A legnagyobb hőmérséklet-különbség 20 °C volt. Közben a beton megkötött és részben megszilárdult.



5.19. ábra. 4 m-es betonfal hőmérséklet-eloszlása és feszültségei.
 a) hőmérséklet-eloszlás a keresztmetszet mentén az első négy napon;
 b) feszültségeloszlás a 4. napon

Az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás hatására egyenlőtlen nyúlásoknak kellene fellépni. Mivel ez nem lehetséges, a beton belsejében nyomó-, a szélein húzófeszültségek lépnek fel. A betonban keletkező legnagyobb húzófeszültség

$$\sigma_{ct, max} = k_D \cdot \Delta T \cdot \alpha_t \cdot \frac{E_{0,t}}{1 + \varphi} \quad (\text{kp} / \text{cm}^2)$$

képlettel fejezhető ki, ahol

k_D az építményrész vastagságának hatását kifejező tényező,
 (nagyon vékony szerkezeteknél: $k_D \rightarrow 0,5$,
 nagyon vastag szerkezeteknél: $k_D \rightarrow 1,0$)

ΔT a mag és a felület hőmérséklet-különbsége,

α_t a beton hőtágulási tényezője, kb. $10 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$,

$E_{0,t}$ a beton húzási rugalmassági modulusa, $0,5 - 5 \cdot 10^5 \text{ kp/cm}^2$,

φ a kúszási tényező, a kortól függően 0–10.

k_D a keresztmetszet méreteit, illetve a hőmérséklet-eloszlási ábra alakját kifejező tényező. Ugyanis a húzó- és nyomóerőknek egyensúlyban kell lenni. A feszültségi ábrán a hőmérséklet-eloszlás ismeretében területkiegyenlítéssel határozhatjuk meg (5.19b ábra). A k_D tényező azt juttatja kifejezésre, hogy a kiegyenlítés folytán a ΔT hőmérséklet hányadrésze okoz húzófeszültséget a szélső szálban. Az első napon $k_D = 1,0$; a 4. napon kb. kétharmad.

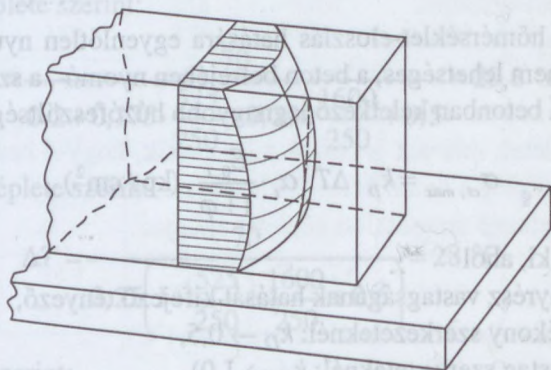
Igen bizonytalan a φ a kúszási tényező értéke frissbetonban, és ugyancsak alig ismert az E húzási rugalmassági modulusa. Wischers (1964) φ értékét a közelítő számításokban 1,0-ra, a húzási rugalmassági modulusát pedig $2 \cdot 10^5 \text{ kp/cm}^2$ -re becsülte.

Kezdetben a beton húzószilárdsága is kicsi. Amennyiben fenti képlettel kiszámított, illetve a tényleges húzófeszültség túllépi a beton húzószilárdságát, a betonban

repedések keletkeznek. Ezek a repedések ún. kéregrepedések, mivel csak a nagy húzófeszültségek zónájában lépnek fel. Ha a mag lehül, ezek a repedések újra zárulnak és lehetséges, hogy részben összehegednek, de mégis elkerülendők, mert a beton tönkremenetelének kiindulási helyei lehetnek.

5.4.2.3. Kényszerfeszültségek és átmenő repedések közelítő számítása

A hidratációhő hatására bizonyos hőmennyiség felszabadul, és nő a beton hőmérséklete. Ezzel egyidejűen megindul a hőáramlás a betontömb szabad oldalai felé. Így a betontömb belsejében pl. az 5.20. ábrán feltüntetett hőmérséklet-eloszlás alakul ki. A beton felső része jobban hül, mint az alaptesttel érintkező. A legkisebb hőmérséklet a felső élek mentén alakul ki, mivel ott a beton két irányban hül. A hőmérséklet hatására a beton kitágul, részben olyan állapotban, amikor a mag feszültségei nélkül is alakváltozni tud.



5.20. ábra. Betonfalazat hőmérséklete a hidratációhő miatt

Ha a betontömb kihül, összehúzódik. Ha az összehúzódás gátolt, akkor feszültségek lépnek fel. Ha a betonfal görgőkkel volna alátámasztva, akkor ilyen feszültségek kismértékben keletkezhetnének (5.2a ábra). A betonfalat azonban általában alátámasztják, sőt az alap- (szikla) és a felmenőfal közötti kapcsolatot gyakran acélbetétek beépítésével is javítják. Így az alaptestnél gyakorlatilag nem rövidülhet meg (5.2b ábra). Ez okból hosszirányában húzófeszültségek, az alaptestben nyomófeszültségek keletkeznek. Ha a húzófeszültségek túllépik a húzószilárdságot, akkor a fal a hosszirányára merőleges irányban megreped. Ezek a repedések általában valamivel a fal és az alap közti hézag fölött kezdődnek, mert a beton a csatlakozó síkban valamivel hidegebb (5.20. ábra) és mert a fal talprésze az alaphoz való merev kötés miatt egyenesen nyúlik, és ezért nagyon sok rövid, láthatatlan mikrorepedést szenved. A repedések gyakran nem hatnak fel a fal koronájáig, hanem annak kb. 2/3-ad részéig. Ennek oka az, hogy a korona kevésbé melegszik fel (5.20. ábra) és a fal felső szakasza sokkal

szabadabban rövidülhet meg. A jelenség azonban a fal méreteitől is függ. Ha a korona a talpához képest meg akar rövidülni, akkor nyírófeszültségek keletkeznek és ha a nyírófeszültségek bizonyos értéket túllépnek, akkor repedéseket okoznak. Minél magasabb a fal, annál kisebbek ezek a nyírófeszültségek, melyek a felső rész bizonyos rövidülése következtében fellépnek. Ezért magasabb támfalaknál ritkán találunk a koronáig látható repedéseket, azonban alacsony falaknál a repedések majdnem mindig teljesen áthatnak. Azok a repedések, melyek a koronáig érnek, rendszerint nagyon szélesek és felfelé szélesednek. Gyakran lefelé az alaptestbe is behatolnak, mert az átmenő repedés felett az alaptestben negatív nyomatéki csúcs keletkezik. A kéregrepedésekkel szemben ezek a repedések az egész falvastagságon áthaladnak, ezért átmenő repedéseknek nevezzük azokat. A falban keletkező húzófeszültségeket az alábbi egyenlet szerint lehet számítani:

$$\sigma_{\alpha} = k \cdot (T_2 - T_1) \cdot \alpha_t \cdot \frac{E_t}{1 + \varphi} \quad (\text{kp / cm}^2)$$

Ebben az egyenletben T_2 a fal legnagyobb középfőmérséklete a felmelegedéskor és T_1 az alaptest középfőmérséklete. A k tényezőt a fal és az alaptest közötti elcsúszás lehetősége (görgők esetén $k = 0$), az alap és a fal keresztmetszetének viszonya és ezeknek a szerkezeti részeknek a rugalmassági modulusa befolyásolja. Sziklatalaj esetén k közel egyenlő 1-gyel és általában k nagyobb 0,8-nál. Minthogy a húzófeszültségek csak a fal betonjának lehűlése folyamán lépnek fel, feltételezhető, hogy addigra a beton húzószilárdsága 2,1 N/mm² értékű. A húzófeszültség túllépésekor keletkező repedési folyamatot az alábbi módon lehet magyarázni.

A fal végén a fal tengelyével párhuzamos húzófeszültség 0. A húzófeszültség ezután a faltengely irányában mindaddig nő, amíg eléri a beton húzószilárdságát. Ezen a helyen tehermentesítő repedés keletkezik a fal tengelyére merőleges síkban. Ez a jelenség ismétlődik és ezzel magyarázható az ilyen repedések többnyire szabályos távolsága. Fenti egyenlet tehát csak tájékoztat afelől, hogy átmenő repedések veszélye fennáll-e. Azonban nem ad meghatározást az ilyen adott esetben fellépő repedésekre vonatkozóan.

5.4.3. A repedésveszély becslése gépi számítással

5.4.3.1. Bevezetés

A vastagfalú vasbeton szerkezet feszültségállapota nagyon összetett probléma. Így a gyakorlati számítási eljárások – elsősorban a vizsgált fiatal betonra vonatkozóan – közelítően veszik figyelembe számos tényezőnek a hőmérséklet okozta feszültségekre gyakorolt hatását, elsősorban ezek örökölhető jellegét. Ez indokolható a rugalmassági modulus és a lassú alakváltozás mértékének időbeni változásával.

Csak közelítő számításra vállalkozhatunk. A hibalehetőség csökkentése miatt a feladatot nem egy lépésben oldottuk meg (nem építettük be a gépi programba a beton mechanikai anyagjellemzőit), hanem több lépésben, mert ezáltal az egyes eredmények jobban ellenőrizhetők voltak.

Végül megjegyezzük, hogy a biztonság javára elhanyagoltuk az acélbetétek feszültségcsökkentő hatását.

Továbbiakban a Paksi Atomerőmű és az átmeneti hulladéktároló vasbeton szerkezeti vizsgálatát mutatjuk be [Balázs–Rácz–Suri–Varga–Tóth (1988) és Balázs–Fehér–Szombathy–Tóth–Zsigovics (1982)]

5.4.3.2. A hőmérséklet-számítás elve

A betonban kialakuló hőmérséklet-eloszlás a hővezetés differenciál-egyenletének [Likov (1972)] megoldásával írható le. Mivel a beton kötése hőfejlődéssel jár, a differenciálegyenlet forrástaggal kiegészített változatát kell használnunk. A megoldandó egyenlet általános formában:

$$\operatorname{div}[\lambda(t, T) \cdot \operatorname{grad} T(x, y, z, t)] + \dot{q}(t, T) = c(t, T) \cdot \rho(t, T) \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

ahol x, y, z a koordináták,

t az idő,

$T(x, y, z, t)$ a hőmérséklet,

$\dot{q}(t, T)$ az egységnyi idő alatt egységnyi térfogatban fejlődött hő,

$\lambda(t, T)$ a hővezetési tényező,

$c(t, T)$ a fajhő,

$\rho(t, T)$ a testsűrűség.

Tehát T a helynek és időnek, $\dot{q}, \lambda, c, \rho$ az időnek és a hőmérsékletnek a függvénye.

A Paksi Atomerőmű Átmeneti Hulladéktárolója oldalfalazatában és a legtöbb esetben a probléma kétdimenziósnak tekinthető, így a megoldandó egyenlet

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \right) [\lambda(t, T) \cdot \operatorname{grad} T(x, z, t)] + \dot{q}(t, T) = c(t, T) \cdot \rho(t, T) \cdot \frac{\partial T(x, z, t)}{\partial t} \quad (2)$$

A peremfeltételek mellett nehézséget okoz az anyagjellemzőknek a hőmérséklettől (s ezen keresztül a helytől), illetve az időtől való függése. Mindezek figyelembevételével a fenti differenciálegyenlet analitikus megoldását el kellett vetnünk, és közelítő megoldáshoz kellett folyamodnunk.

A fenti differenciálegyenlet egyik szokásos megoldási módja az ún. véges különbségek módszere. A megoldás során a differenciálegyenletet egymás utáni kis Δt időszakaszokra és ΔV térfogatelemekre érvényes differenciaegyenletekké alakítják át, s így az egyes térfogatelemek hőmérsékletei minden Δt időszakban lineáris algebrai

egyenletrendszer megoldásaiként nyerhetők. A differenciaegyenlet-rendszer felírásának módja az irodalomban sok helyen megtalálható.

Nem ezt az utat követtük, hanem a vele matematikailag egyenértékű elemi mérleg-egyenletek módszerét használtuk [Mikhejev (1968)]. Ez utóbbi módszer a véges különbség módszerével azonos differenciaegyenlet-rendszerre vezet, s lényege a következő:

Kiválasztjuk a vizsgált közeg egy pontja körüli kis ΔV_i térfogatelemet (5.21. ábra), amelybe a szomszédos térfogatelemből hő áramlik be (illetve azokból ki). Ha egy adott t időpillanatban ezek az előjeles hőáramok $I_1^i(t) + I_2^i(t) + I_3^i(t) \dots I_n^i(t)$, az egységnyi térfogatban időegység alatt fejlődő hő $\dot{q}_i(t)$, a közeg sűrűsége az adott helyen ρ_i , a fajhője c_i , a térfogatelem hőmérséklete $T_i(t)$, akkor a térfogatelemben a $(t+\Delta t)$ időközben eltelt Δt idő alatt felhalmozódott hő:

$$Q_i = [I_1^i(t) + I_2^i(t) \dots I_n^i(t) + \dot{q}_i(t) \cdot \Delta V_i] \cdot \Delta t = \left(\sum_{j=1}^n I_j^i(t) + \dot{q}_i(t) \cdot \Delta V_i \right) \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Ennek hatására megváltozik a térfogatelem hőmérséklete valamilyen $T_i(t+\Delta t)$ értékre, s a közölt hővel az ismert

$$\Delta Q_i = c_i \cdot \rho_i \cdot \Delta V_i [T_i(t+\Delta t) - T_i(t)] \quad (4)$$

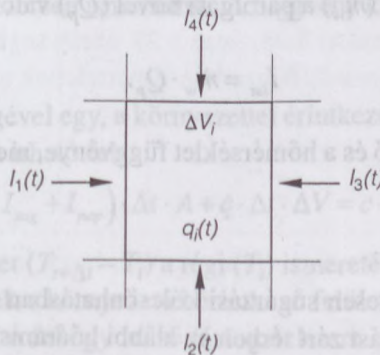
összefüggésben van. Beírva ide a közölt hőáramokkal és forrásokkal kifejezett alakját, alábbi egyenletet kapjuk az i -edik térfogatelem megváltozott hőmérsékletére:

$$T_i(t+\Delta t) = T_i(t) + \frac{\Delta t}{c_i \rho_i \Delta V_i} \left\{ \sum_{j=1}^n I_j^i(t) + \dot{q}_i(t) \cdot \Delta V_i \right\}, \quad (5)$$

$i = 1, 2, 3 \dots N$ (N az összes térfogatelem száma).

Így az egyes térfogatelemek kezdeti hőmérsékleteit, a q_i forrást és az I_j^i áramokat ismerve, a hőmérséklet időbeli változása Δt időlépésekben minden térfogatelemben kiszámítható.

Mint említettük a fenti módszer csak az I_j^i hőáramok és a q_i hőforrás ismeretében használható. Most röviden ismertetjük, hogy a hőáramoknak milyen típusai fordulnak elő a vizsgált esetekben és ezeket hogyan vettük számításba.



5.21. ábra. A vizsgált térfogatelem

a) Hővezetés

A két szomszédos térfogatelem között a vezetési úton folyó hőáramsűrűséget (I_{vez}) a Fourier-törvény segítségével számítjuk és az

$$I_{vez} = \frac{\lambda}{d} \cdot (T_2 - T_1) \cdot \Delta A \quad (6)$$

függvénnyel írjuk le, ahol

λ az általában helytől és időtől függő hővezetési tényező,

d a T_1 és T_2 hőmérsékletű helyek távolsága,

ΔA a hőáram irányára merőleges felület.

b) Hőátadás

A szilárd felület és a környező levegő közötti hőátadás két részfolyamat eredménye. Az egyik a szokásos hőátadás, a másik pedig – legalábbis kezdetben – a beton felületén elpárolgó víz latens hője. Ezek különválaszthatók.

A közönséges hőátadást az alábbi – a v légsebességet is tartalmazó – összefüggéssel adjuk meg [Budiko (1956)]:

$$I_{konv} = \alpha(T, v) \cdot (T_k - T_f), \quad (7)$$

ahol T_k a környező levegő hőmérséklete,

T_f a felület hőmérséklete,

$\alpha(T, v)$ a hőátadási tényező.

A hőátadás SI egységekkel:

$$\alpha(T, v) = 7,32 \cdot v^{0,656} + B |T_k - T_f|^{1/3} \cdot e^{-1,91v}, \quad (8)$$

A képletben B egy a felület helyzetétől függő konstans, melynek értéke vízszintes felfelé néző felület esetén: $B \approx 1,5$. $A_v = 0$ esetben egyébként a (9) összefüggés a szabad konvekcióra érvényes hőátadási tényezőt adja vissza.

A párolgás okozta hővesztéséget az egységnyi felületről egységnyi idő alatt elpárolgott víz mennyiségének (m_w) a párolgási hővel (Q_p) való szorzata adja:

$$I_{lat} = \dot{m}_w \cdot Q_p. \quad (9)$$

Az m_w mennyiség az idő és a hőmérséklet függvénye, melyet empirikus úton kaphatunk meg.

c) Sugárzásos hőcsere

A beton felülete természetesen sugárzási kölcsönhatásban áll a környező testekkel. Ezt a sugárzási kölcsönhatást zárt térben az alábbi hőáramsűrűséggel vesszük figyelembe (SI egységben) [Mikhejev (1968)]:

$$I_{\text{sug}} = 5.68a_f \left[\left(\frac{T_B}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right], \quad (10)$$

ahol a_f a betonfelület feketedési foka,

T_f a betonfelület hőmérséklete K-ben,

T_B a felülettel sugárzási kölcsönhatásban álló testek átlagos hőmérséklete, K.

Ha a betonfelület a szabad ég alatt van, akkor az atmoszférával való sugárzási kölcsönhatás miatt (11) az alábbi összefüggés érvényes [Wischers–Manns (1974)]:

$$I_{\text{sug}} = 5.68a_f \left[\phi(p) \cdot \left(\frac{T_K}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \quad (11)$$

ahol $\phi(p)$ a levegő páratartalmától (p : páryanomás) és a felület helyzetétől függő szám,

T_K a környező levegő hőmérséklete, K.

d) Napsugárzás

A hőmérsékletek alakulását a napsugárzás is befolyásolja. Ez egy forrásként vehető figyelembe a napsugárzásnak kitett felületrészekben. Ha a napsugárzás intenzitása I_N , a felület napsugárzásra vonatkozó abszorpciós tényezője A_N , akkor a forrás:

$$\dot{q}_n = A_N \cdot I_N \frac{\Delta A}{\Delta V}, \quad (12)$$

ahol ΔV a vizsgált térfogatelem nagysága,

I_N természetesen időben változó lehet.

e) A cement hidratációhője

A hidratációhő belső hőforrásként vehető figyelembe, s szintén időben változó mennyiség:

$$\dot{q} = \dot{q}(t, T). \quad (13)$$

A hidratációhőt külön fejezetben ismertettük. A függvény kísérlettel határozandó meg.

f) A mérlegegyenlet

Fenti kifejezések segítségével egy, a környezettel érintkező térfogatelemre a mérlegegyenlet az alábbi módon írható fel:

$$(I_{\text{vez}} + I_{\text{konv}} + I_{\text{lat}} + I_{\text{sug}} + I_{\text{nap}}) \cdot \Delta t \cdot A + \dot{q} \cdot \Delta t \cdot \Delta V = c \cdot \rho \cdot \Delta V (T_{t+\Delta t} - T_t). \quad (14)$$

Innen az új hőmérséklet ($T_{t+\Delta t} - T_t$) a régi (T_t) ismeretében számítható (az egyenletben A a térfogatelemnek a környezettel érintkező felülete).

Hasonló egyenlet írható fel egy belső térfogatelemre is, csak ott a (14) egyenlet bal oldalán álló zárójelben csak a vezetési tag szerepel.

5.4.3.3. A kéregrepedések keletkezése valószínűségének vizsgálata

A vizsgálat menete

Ennek a feladatnak a megoldását gépi számításra alapoztuk. Mivel az egyes feladatrészeket különböző megbízhatósággal tudtuk megoldani, ezért a gépi programot csak a hőmérséklet-eloszlás megoldására használtuk, míg az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból származó feszültségeket hagyományos módszerekkel számítottuk. A számítás menete tehát a következő volt:

- Felírtuk a hővezetés differenciálegyenletét az adott feladatra és megoldására számítógépes programot dolgoztunk ki a befolyásoló tényezők figyelembevételével (5.4.3.2. fejezet).
- Ellenőriztük a gépi számítás helyességét a modellen kapott mérési eredményekkel való összehasonlítás útján.
- Meghatároztuk a hőmérséklet-eloszlást gépi számítással. A számításba vett változókat az 5.10. táblázat szemlélteti. A folyamatos betonozást az 5.25., a szakaszos betonozást az 5.26. ábra szerint modelleztük.
- Meghatároztuk a hőmérsékleti feszültségeket a hőmérséklet-eloszlások alapján a következők szerint:

– A hőmérsékleti feszültségeket (sajátfeszültségeket) az 5.1. ábra szerint tételeztük fel és ΔT értékét a hőmérsékleti ábrákból planimetralás segítségével határoztuk meg.

– Felrajzoltuk a húzófeszültségek tartományába eső átlagos hőmérséklet időbeni alakulását (pl. 5.27. ábra) és a vizsgált korra vonatkozóan – planimetralás segítségével – meghatároztuk az átlagos hőmérsékletet (T_m).

– Az átlaghőmérséklet segítségével képlettel kiszámítottuk a beton egyenértékű korát. A képletben t a beton tényleges korát jelenti. Ezen azt a kort értettük, amelyet a beton tényleges kora helyett veszünk figyelembe, feltételezve, hogy a tényleges hőmérsékleten a beton szilárdsága és rugalmassági modulusa ugyanakkora lesz, mint 20 °C hőmérsékleten az *egyenértékű kor* (t_{20}) tartama alatt.

– Az egyenértékű kor figyelembevételével kiszámítottuk a beton E_0 kezdeti rugalmassági modulusát az 5.28. és az 5.29. ábrák segítségével. Az ábrákon feltüntettük azt is, hogy a 2. fejezetben ismertettek alapján hogyan számítjuk $f_{c,pr}$ és $E_{0,c-t}$.

Kiszámítottuk $\sigma_{ct,max}$ értékét:

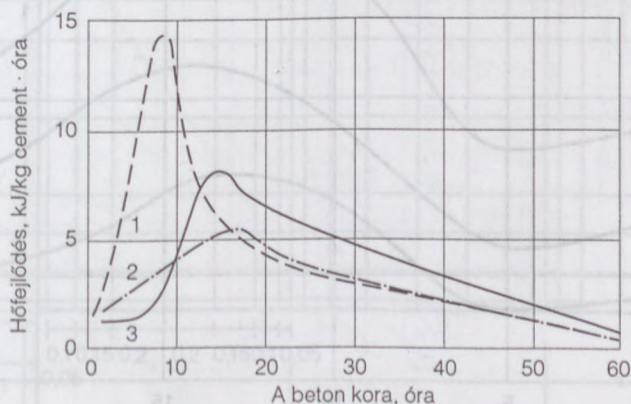
$$\sigma_{ct,max} = \alpha \cdot E_{0,c} \cdot \Delta T$$

képletből. A számítás során feltételeztük, hogy a húzási és nyomási rugalmassági modulus azonos, valamint azt, hogy a beton rugalmasan viselkedik.

– Az 5.30. és az 5.31. ábrák segítségével, az egyenértékű kor felhasználásával meghatároztuk a beton húzószilárdságát (f_{ct}).

5.10. táblázat. A számításba vett változók

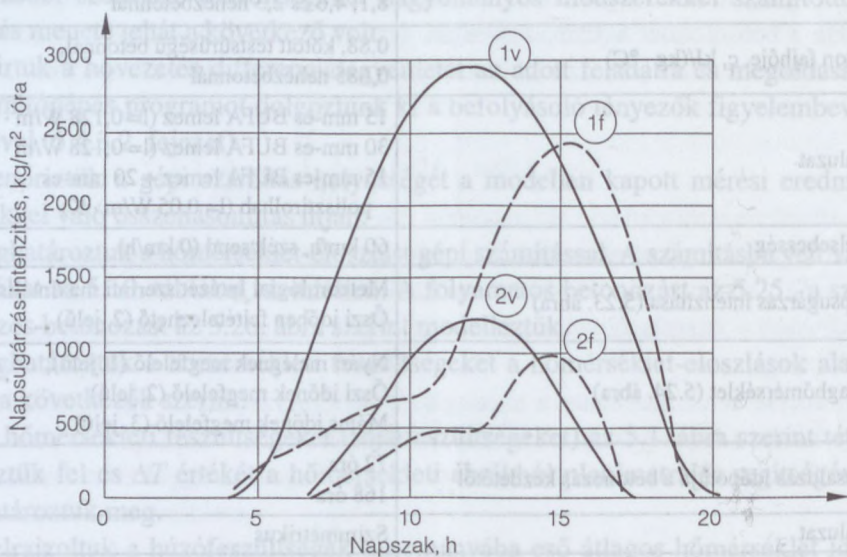
Jellemzők	Értékhatarok
Cement hidratációhője (5.22. ábra)	indulási hőmérséklet = 20 °C indulási hőmérséklet = 10 °C indulási hőmérséklet = 25 °C + kötéskelettel
Hővezetési tényező, λ , W/(m · K)	4 kötött testsűrűségű betonnál; 8,1; 4,6 és 2,3 nehézbetonnál
Beton fajhője, c , kJ/(kg · °C)	0,88, kötött testsűrűségű betonnál, 0,685 nehézbetonnál
Zsaluzat	15 mm-es BUFA lemez ($l=0,128$ W/m · K) 30 mm-es BUFA lemez ($l=0,128$ W/m · K) 15 mm-es BUFA lemez + 20 mm-es polisztirolhab ($l=0,05$ W/m · K)
Szélsébség	60 km/h, szélcsend (0 km/h)
Napsugárzás intenzitása (5.23. ábra)	Meteorológiai Intézet szerinti maximális (1. jelű), Őszi időben feltételezhető (2. jelű)
Átlaghőmérséklet (5.24. ábra)	Nyári melegnek megfelelő (1. jelű), Őszi időnek megfelelő (2. jelű), Május időnek megfelelő (3. jelű)
Kizsaluzás időpontja a betonozás kezdetétől	72 óra 168 óra
Zsaluzat	Szimmetrikus
Betonozás menete	Folyamatos Szakaszos: 1,5 m-es réteg naponként, 1,5 m-es réteg 2 naponként
Hálóosztás	5.25, ill. 5.26. ábra szerinti



5.22. ábra. Hidratációhő-függvények

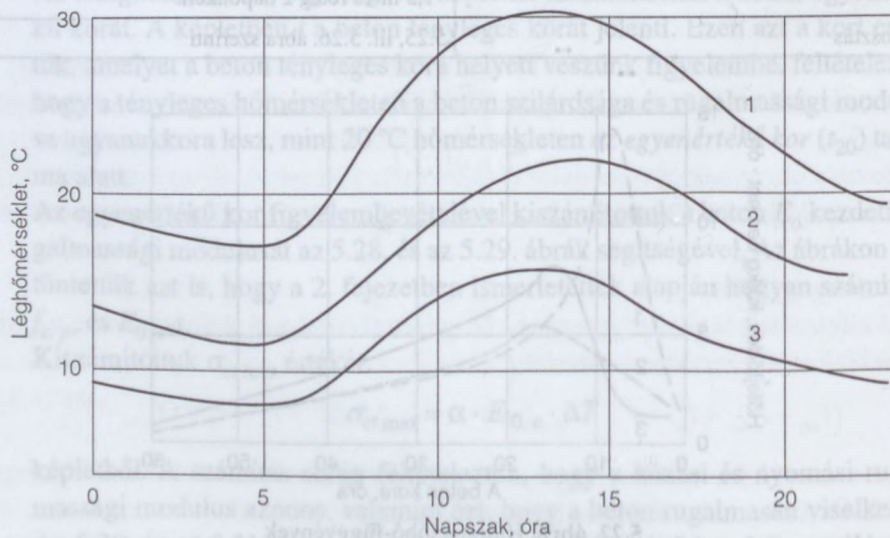
1 – A frissbeton hőmérséklete +25 °C; 2 – A frissbeton hőmérséklete +10 °C;
3 – A frissbeton hőmérséklete +25 °C kötéskelettel

- Nincs repedésveszély, ha $\sigma_{ct\ max} < f_{ct}$.
- Ellenőriztük a repedésveszélyt a RILEM irányelvek szerint is. Eszerint nincs repedésveszély, ha az 5.30. és 5.31. ábrákból a DIN 1048 szerint meghatározott hajlító–húzószilárdság (f_{ct} , f_t) nagyobb a legnagyobb hőmérséklet-különbség alapján az 5.32. ábrából meghatározott hajlító–húzószilárdságnál.
- Végül megvizsgáltuk a lassú alakváltozás feszültségcsökkentő szerepét.



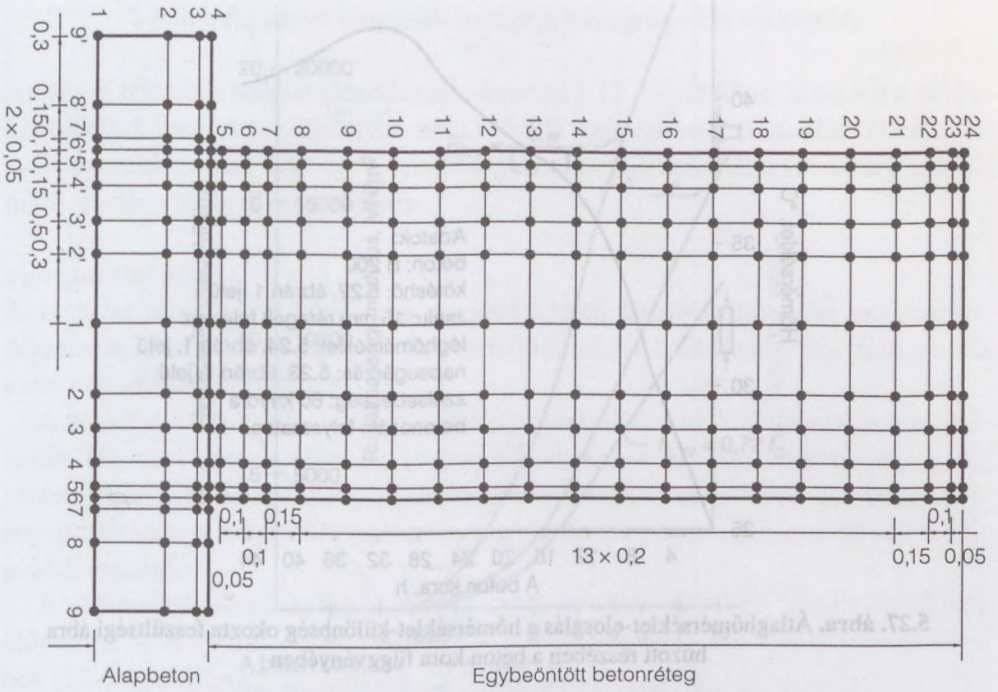
5.23. ábra. A napsugárzás intenzitása

1 – nyáron; 2 – ősszel és tavasszal; f – függőleges felület; v – vízszintes felület

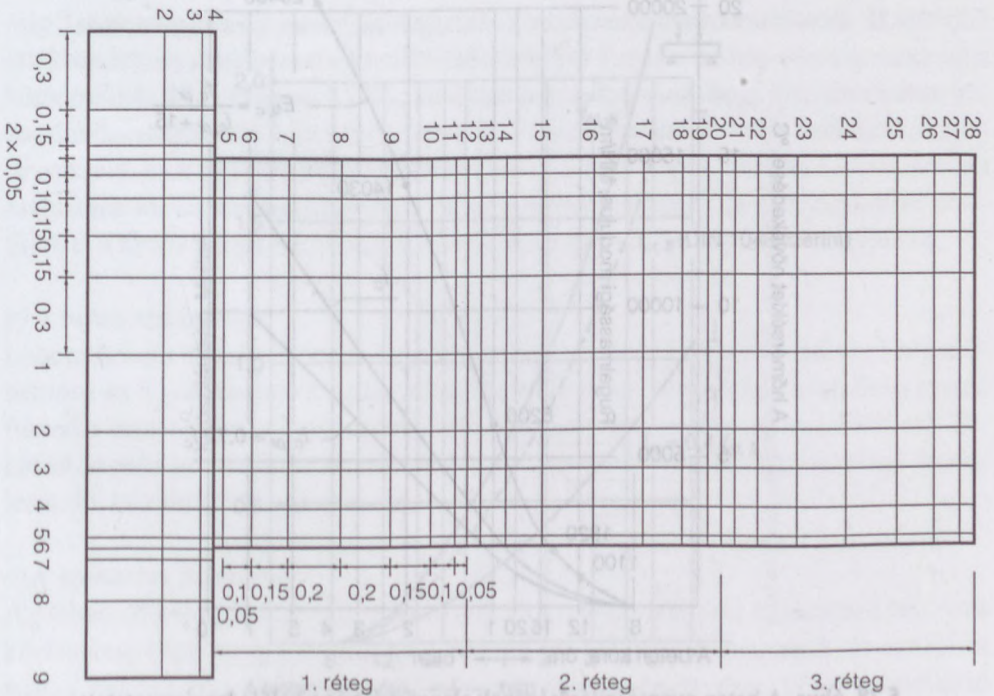


5.24. ábra. A léghőmérséklet időbeni alakulása

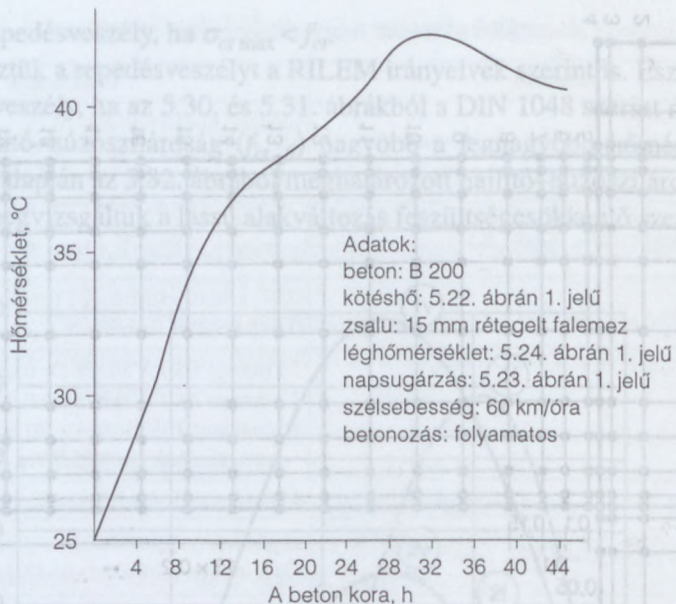
1 – nyári meleg; 2 – őszi és tavaszi idő; 3 – májusi időnek megfelelő



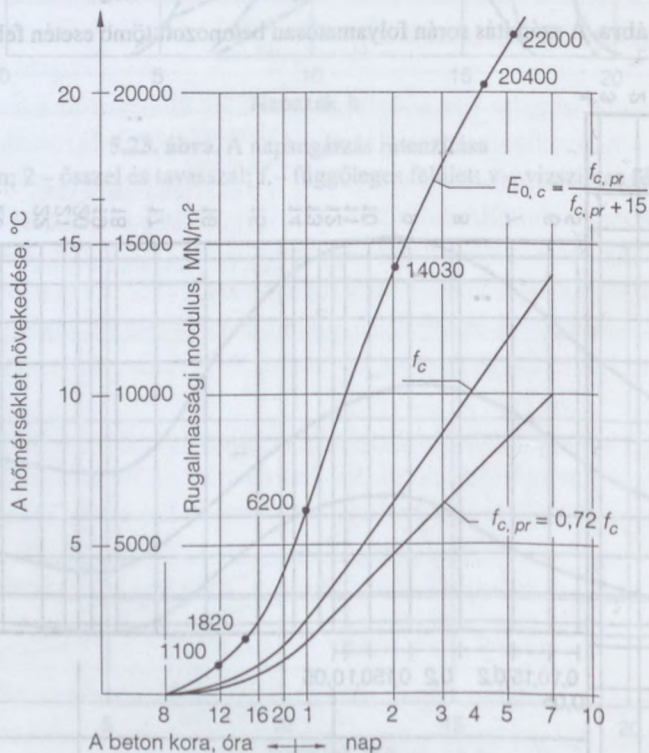
5.25. ábra. A számítás során folyamatosan betonozott tömb esetén felvett háló



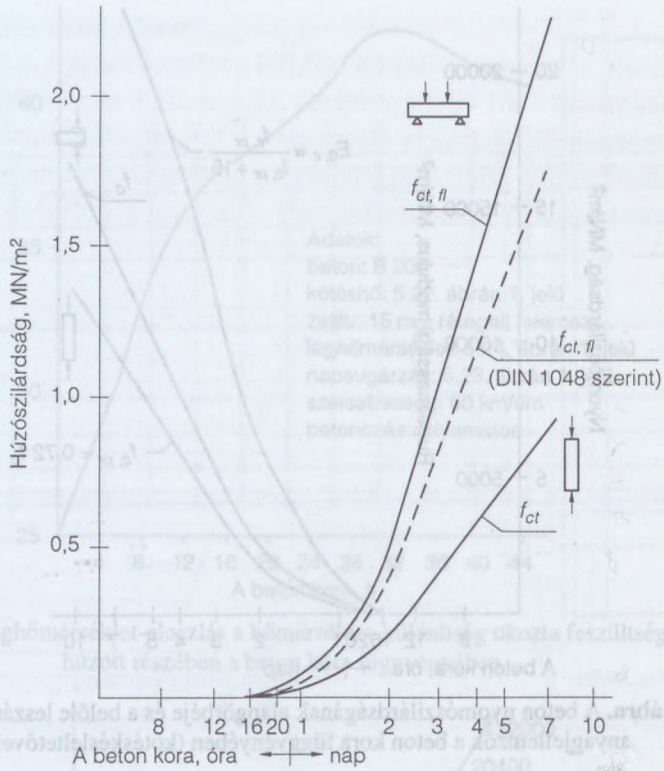
5.26. ábra. A számítás során a szakaszosan betonozott tömb esetén felvett háló



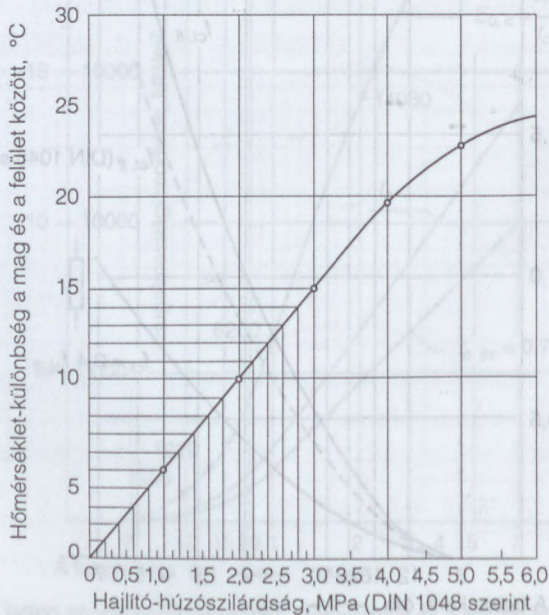
5.27. ábra. Átlaghőmérséklet-eloszlás a hőmérséklet-különbség okozta feszültségi ábra húzott részében a beton kora függvényében



5.28. ábra. A beton nyomószilárdságának alapgörbéje és a belőle lezármatott anyagjellemzők a beton kora függvényében



5.31. ábra. A beton húzószilárdságának az alapgörbéje a beton kora függvényében (kötéskésleltetéssel)



5.32. ábra. A kéregrepedés veszélyének a becslése a DIN 1048 szerint

5.4.3.4. Az egyes tényezők hatása a kéregrepedés veszélyére

Az egyes tényezők hatásának a vizsgálatához az 5.11. táblázatban feltüntetett példákat oldottuk meg. A továbbiakban nem vesszük számításba a lassú alakváltozás feszültségsökkenítő hatását. Így a feszültségek nagysága nem, de a feszültségek egymáshoz való viszonya így is helyes.

a) A zsaluzat hatása

A zsaluzat hőszigetelő képessége nagymértékben befolyásolja a fal hőállapotát. A zsaluzat hőszabályozó szerepét jól szemlélteti az 5.12. táblázat (nyári melegt, 60 km/ó szélsébséget feltételezve).

A zsaluzat hatását a hőmérséklet-eloszlás alakulására az 5.33. ábrán is szemléltettük. Ha a zsaluzat vastagságát 15 mm-ről 30 mm-re növeltük, akkor a $\sigma_{ct \max}/f_{ct}$ viszonyszám 0,63-ra csökkent. Ha a 15 mm-es rétegelt fazsaluzatra 20 mm-es műanyag hab lemezt helyeztünk, akkor $\sigma_{ct \max}/f_{ct}$ viszonyszám 0,32-re esett le (11–13 példák szerint).

A zsaluzat hatásának az értékeléséhez azonban számításba kell venni a kizsaluzás időpontját is. A 15 mm rétegelt falemez + 20 mm műanyag hab zsaluzó réteg esetében (13–14 példa) az 5.13. táblázat szerinti értékeket kaptuk.

A repedési veszély lényegesen nagyobb, ha a zsaluzatot 72 órás korban távolítjuk el annál, mintha 7 napos korban zsaluznánk ki (5.34. ábra). Ennek egyik oka az, hogy míg 3 napos korban a beton maximális hőmérséklete alig kezd csökkenni az abszolút értékben legnagyobb hőmérséklethez képest, addig 7 napos korban a beton maximális hőmérséklete 49 °C-ról már 35 °C-ra csökkent. Másik oka az, hogy közben a beton húzószilárdsága 0,96-ról 1,39 MN/m²-re nőtt. Példánk során kb. felére csökkent a repedésveszély, ha a nagy melegben betonoztunk és nem 3 napos, hanem 7 napos korban zsaluztuk ki. Továbbá csökkentette volna a repedésveszélyt, ha nem egyszerre távolítjuk el a kettős rétegű zsaluzatot, hanem előbb csak a műanyag habot hagyjuk el.

b) A beton szilárdsága

Laboratóriumi kísérlettel megállapítottuk, hogy az előirt kötött testsűrűségű normálbetonok és a nehézbetonok szilárdulásának az üteme – azonos betonminőség esetén (mivel a cementfajta, a konzisztencia stb. közel azonos) – azonosnak tekinthető. Tehát az azonos körülmények között tárolt, azonos korú betonok rugalmassági modulusát, ill. húzószilárdságát azonosnak vettük.

c) A szakaszos betonozás

A szakaszos betonozás vizsgálata során 1,5 m vastag rétegeket tételeztünk fel. Az a körülmény, hogy nem folyamatosan, hanem szakaszosan betonozunk, és az 1,5 m vastag rétegek 24 óránként követik egymást, azt eredményezte, hogy a keletkező maximális hőfeszültségek az első betonozást követő 48 óra múlva a 2/3-ára, ha a

5.11. táblázat. A gépi számítás során feltételezett adatok

Példa sorszáma	Beton-minőség	Kötéshő jele az 5.22. ábra jelöléseivel	Zsaluzat	Lég hőmérséklet az 5.24. nap-sugárzás intenzitása az 5.23. ábra jelöléseivel	Szél-sebesség, km/h	Betonozás	Gépfutási időtartam, betonozás, ideje, λ
	2	3	4	5	6	7	8
1	B 200	1	15 mm rétegelt falemez	1	60	folyamatos	3 nap, 12 óra, $\lambda = 4,64$
2	B 280	1	15 mm rétegelt falemez	1	60		
3	B 200	1	30 mm rétegelt falemez	1	60		
4	B 200	1	15 mm rétegelt falemez	1	0		
5	B 200	3	15 mm rétegelt falemez	1	60		
6	B 200	3	15 mm rétegelt falemez + 2 cm hablémez	1	60		
7	B 200	2	15 mm rétegelt falemez	2	60		
8	B 200	2	15 mm rétegelt falemez + 2 cm műanyaghab	2	60		
9	B 200	1	15 mm rétegelt falemez	1	60	szakaszos	
10	B 200	3	15 mm rétegelt falemez	1	60		
11	B 200	1	15 mm fa	1	60	folyamatos	3 nap, betonozás 12 óra, $\lambda = 8,1$
12	B 200	1	30 mm fa	1	60		3 nap, betonozás 12 óra, $\lambda = 8,1$
13	B 200	1	15 mm fa + 2 cm hab	1	60		7 nap + 1 nap zsaluzat nélküli; betonozás 12 óra, $\lambda = 8,1$
14	B 200	1	15 mm fa + 2 cm hab	1	60		13 nap + 2 nap kiszaluzva, betonozás 12 óra, $\lambda = 8,1$
15	B 200	1	15 mm fa	1	60		3 nap, betonozás 6 óra, $\lambda = 8,1$
16	B 200	1	15 mm fa	3+1	60		3 nap, betonozás 12 óra, $\lambda = 8,1$
17	B 200	1	15 mm fa	1	60		3 nap, betonozás 12 óra, $\lambda = 4,64$
18	B 200	1	15 mm fa	1	60		3 nap, betonozás 12 óra, $\lambda = 2,32$

5.12. táblázat A zsaluzat hatása a hőmérsékleti feszültségekre

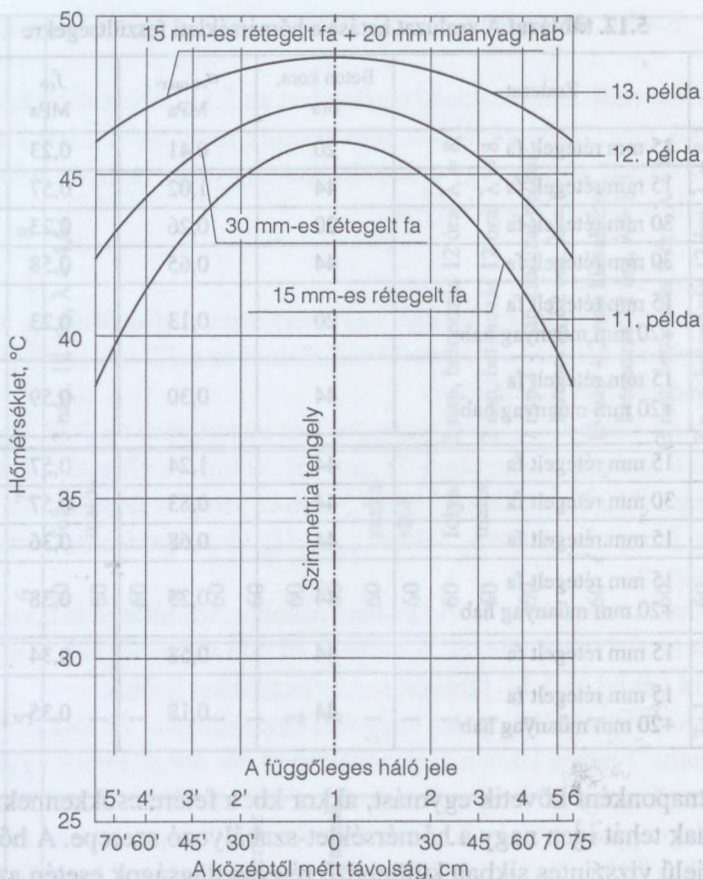
Példa	Zsaluzat	Beton kora, óra	$\sigma_{ct, max}$, MPa	f_{ct} , MPa	Viszonyszám
11	15 mm rétegelt fa	20	0,41	0,23	1,78
11	15 mm rétegelt fa	44	1,02	0,57	1,79
12	30 mm rétegelt fa	20	0,26	0,23	1,13
12	30 mm rétegelt fa	44	0,65	0,58	1,12
13	15 mm rétegelt fa +20 mm műanyag hab	20	0,13	0,23	0,57
13	15 mm rétegelt fa +20 mm műanyag hab	44	0,30	0,59	0,51
1	15 mm rétegelt fa	44	1,24	0,57	2,18
3	30 mm rétegelt fa	44	0,83	0,57	1,46
5	15 mm rétegelt fa	44	0,68	0,36	1,89
6	15 mm rétegelt fa +20 mm műanyag hab	44	0,25	0,38	0,68
7	15 mm rétegelt fa	44	0,58	0,34	1,71
8	15 mm rétegelt fa +20 mm műanyag hab	44	0,18	0,35	0,51

rétegek kétnaponként követik egymást, akkor kb. a felére csökkennek. A szakaszos betonozásnak tehát igen nagy a hőmérséklet-szabályozó szerepe. A hőmérséklet-eloszlást 16 jelű vízszintes síkban különböző rétegvastagságok esetén az 5.35. ábra, a max. hőmérsékletek időbeni alakulását az 5.36. ábra szemlélteti.

5.13. táblázat. A kizsaluzás időpontjának a hatása a hőmérsékleti feszültségekre

Példa	Kizsaluzás időpontja, óra	Beton kora, óra	$\sigma_{ct, max}$, MPa	f_{ct} , MPa	Viszonyszám
13	168	184	2,34	1,39	1,68
14	72	84	3,03	0,96	3,16

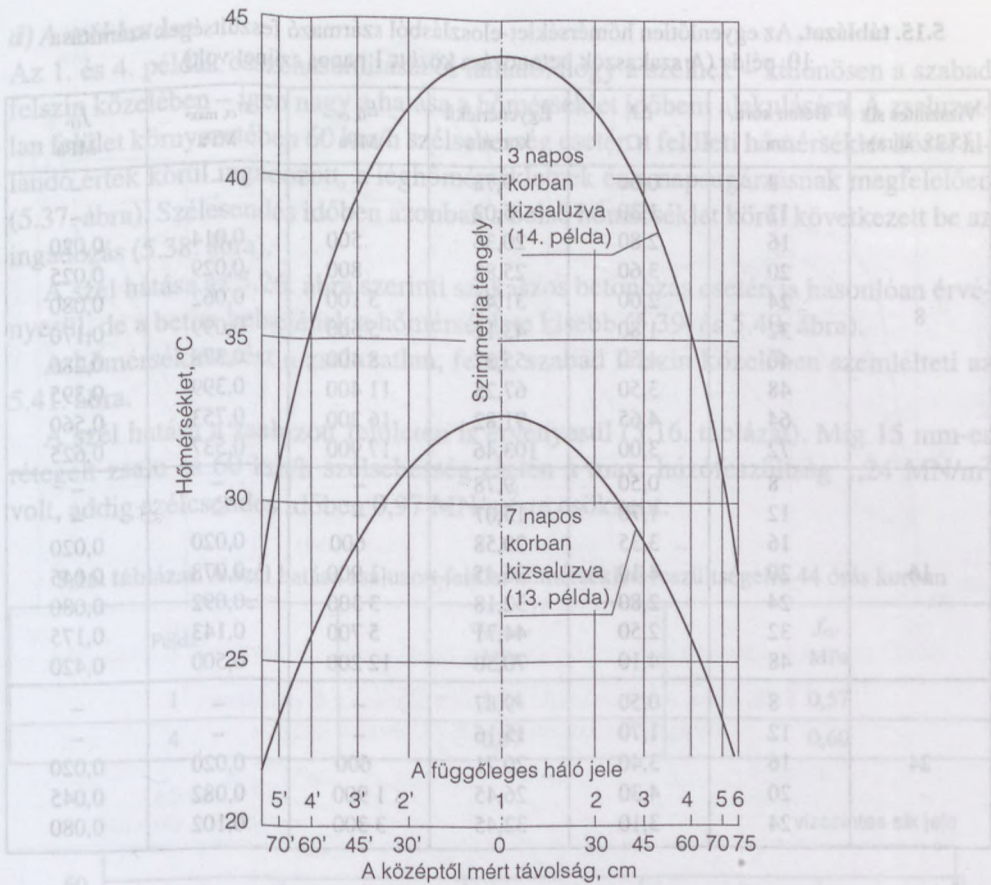
Fenti példákban a legkedvezőtlenebb esetet tételeztük fel. Ha a betonozási hőmérséklet csökken, ha csökken a léghőmérséklet, akkor kedvezőbben alakul a hőfeszültség. A kötészéleltető adalékszer a felszabaduló összes hőmennyiséget nem befolyásolja, de a kezdeti hőfejlődést csökkenti. Az 5. és 10. példa összehasonlításából látható (5.14. és 5.15. táblázat), hogy késleltetett szilárdulás esetén, folytonos betonozást feltételezve, 44 órás korban $\sigma_{ct, max}/f_{ct}$ viszonyszám 1,88, szakaszos betonozást, 1,5 m vastag réteget (5.26. ábra) és közben egy napos szünetet feltételezve 1,12. Tehát a kötészéleltetésnek is kedvező a hatása.



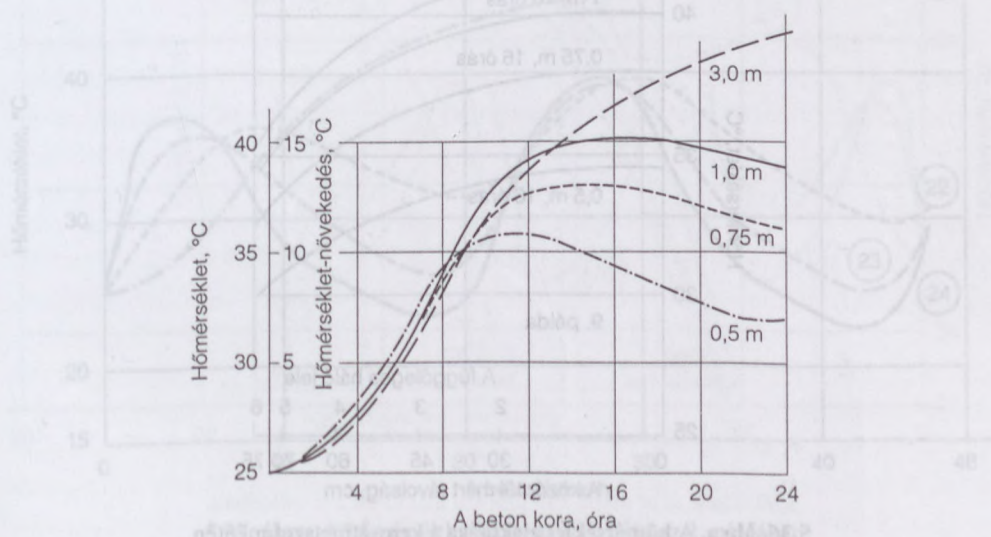
5.33. ábra. A zsaluzat hatása a hőmérséklet-eloszlásra (11–13. péld.)

5.14. táblázat. Az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból származó feszültségek számítása
5. példa

Beton kora, óra	ΔT , °C	Egyenértékű kor, óra	$E_{0, c}$ MPa	$\sigma_{ct, max}$ MPa	f_{cr} MPa
8	1,00	9,63	–	–	–
12	1,00	14,53	–	–	–
16	2,60	19,69	500	0,013	0,02
20	3,70	25,15	1600	0,059	0,04
24	1,80	31,25	3000	0,084	0,08
28	1,90	37,46	4300	0,082	0,12
32	2,80	43,82	5500	0,154	0,17
36	4,70	50,45	700	0,329	0,23
40	6,00	56,97	8500	0,510	0,30
44	6,50	63,87	10500	0,682	0,36



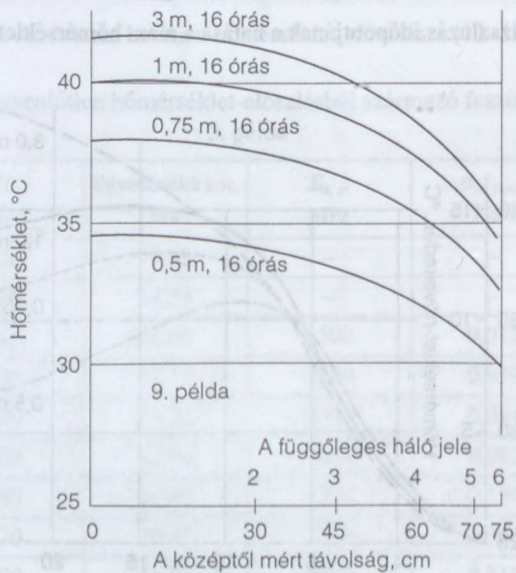
5.34. ábra. A kizsaluzás időpontjának a hatása a max. hőmérséklet-különbségekre



5.35. ábra. A maximális hőmérséklet időbeni alakulása a rétegvastagság függvényében

5.15. táblázat. Az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból származó feszültségek számítása
10. példa (A szakaszok betonozása között 1 napos szünet volt)

Vízszintes sík (5.25. ábra)	Beton kora, óra	ΔT , °C	Egyenértékű kor, óra	$E_{0, cr}$ MPa	$\sigma_{cr, max}$ MPa	f_{cr} MPa
8	8	0,60	9,78	–	–	–
	12	1,30	15,02	–	–	–
	16	2,80	20,36	500	0,014	0,020
	20	3,60	25,82	800	0,029	0,025
	24	2,00	31,46	3 100	0,062	0,080
	32	1,80	43,11	5 500	0,099	0,170
	40	4,50	55,37	8 400	0,378	0,280
	48	3,50	67,25	11 400	0,399	0,395
	64	4,65	91,82	16 200	0,753	0,560
	72	3,00	103,46	17 900	0,537	0,625
16	8	0,50	9,78	–	–	–
	12	1,70	15,07	–	–	–
	16	3,35	20,58	600	0,020	0,020
	20	4,10	26,45	1 900	0,078	0,045
	24	2,80	32,18	3 300	0,092	0,080
	32	2,50	44,71	5 700	0,143	0,175
	48	4,10	70,50	12 200	0,500	0,420
24	8	0,50	9,87	–	–	–
	12	1,70	15,16	–	–	–
	16	3,40	20,71	600	0,020	0,020
	20	4,30	26,45	1 900	0,082	0,045
	24	3,10	32,45	3 300	0,102	0,080



5.36. ábra. A hőmérséklet alakulása a keresztmetszet mentén,
különböző rétegvastagság esetén, 16 órában

d) A szél hatása

Az 1. és 4. példák összehasonlításából látható, hogy a szélnek – különösen a szabad felszín közelében – igen nagy a hatása a hőmérséklet időbeni alakulására. A zsaluzatlan felület környezetében 60 km/h szélesség esetén a felületi hőmérséklet közel állandó érték körül ingadozott, a léghőmérsékletnek és a napsugárzásnak megfelelően (5.37. ábra). Szélcsendes időben azonban a belső hőmérséklet körül következett be az ingadozás (5.38. ábra).

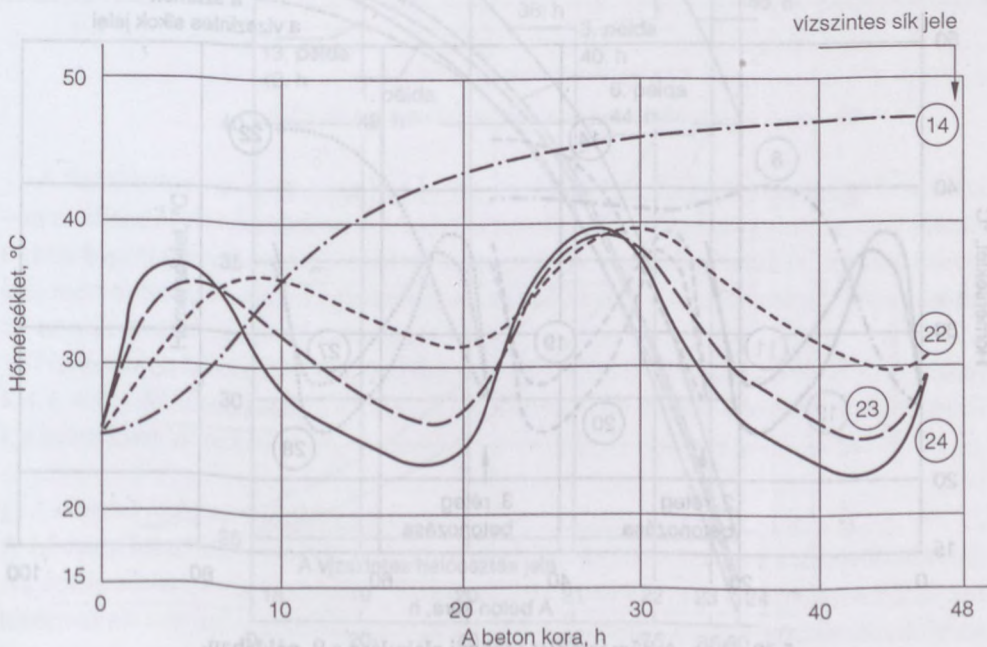
A szél hatása az 5.26. ábra szerinti szakaszos betonozás esetén is hasonlóan érvényesül, de a beton belsejének a hőmérséklete kisebb (5.39. és 5.40. ábra).

A hőmérsékletesést a zsaluzatlan, felső, szabad felszín közelében szemlélteti az 5.41. ábra.

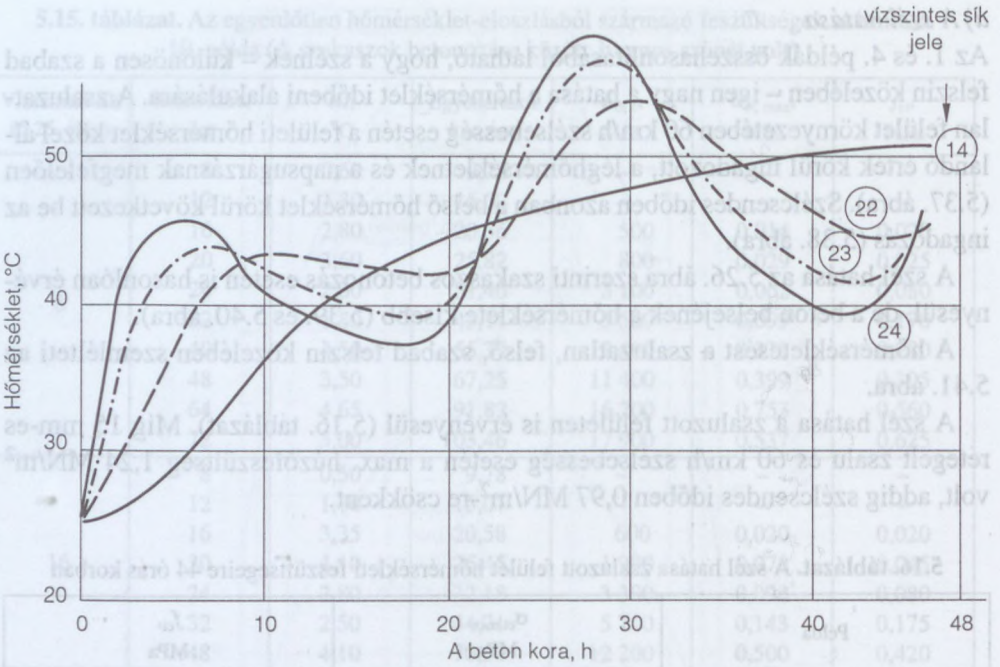
A szél hatása a zsaluzott felületen is érvényesül (5.16. táblázat). Míg 15 mm-es rétegelt zsalu és 60 km/h szélesség esetén a max. húzófeszültség 1,24 MN/m² volt, addig szélcsendes időben 0,97 MN/m²-re csökkent.

5.16. táblázat. A szél hatása zsaluzott felület hőmérsékleti feszültségeire 44 óras korban

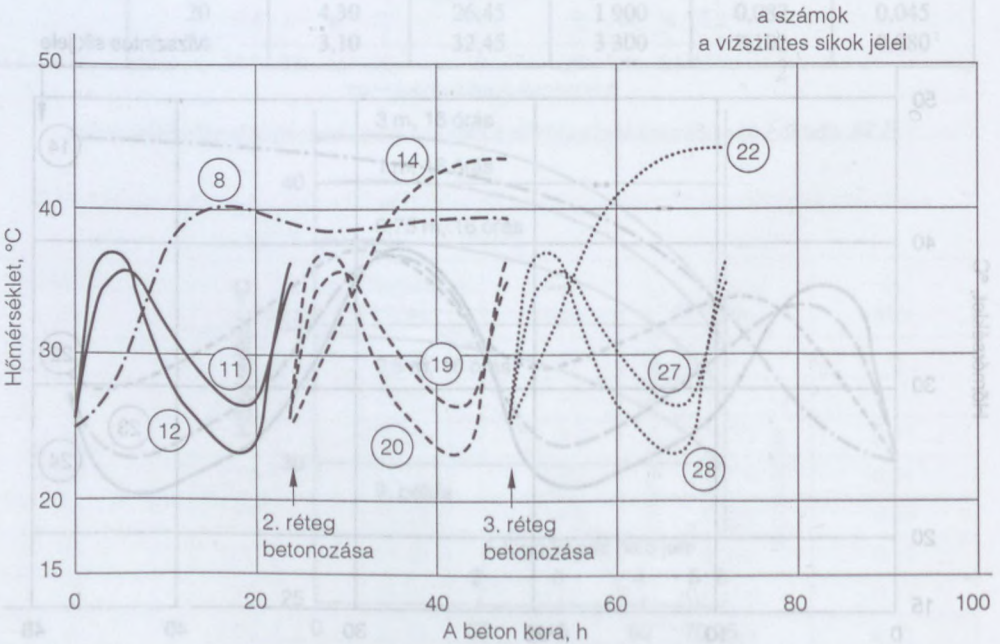
Példa	$\sigma_{ct\ max}$ MPa	f_{ct} MPa
1	1,24	0,57
4	0,97	0,60



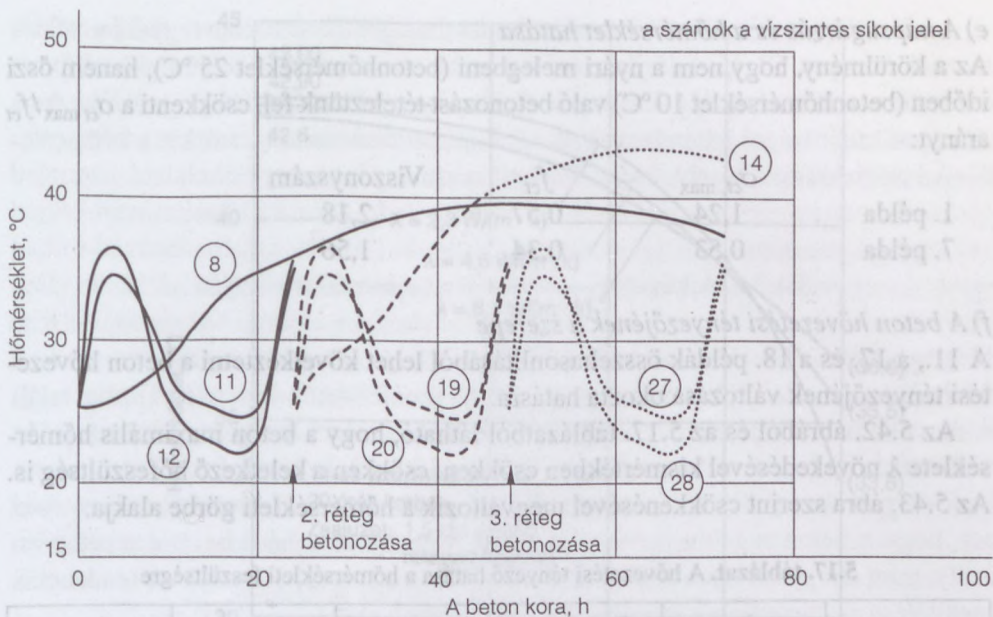
5.37. ábra. A hőmérséklet időbeni alakulása az 1. példában (függőleges középsík, az 5.25. ábrán c jelű)



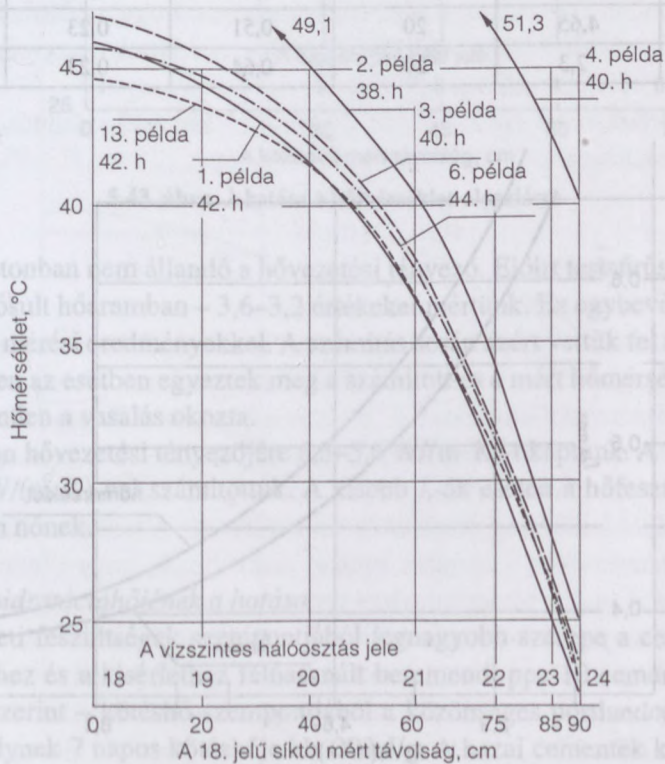
5.38. ábra. A hőmérséklet időbeni alakulása a 4. példában (függőleges középsík, az 5.25. ábrán c jelű)



5.39. ábra. A hőmérséklet időbeni alakulása a 9. példában. A rétegek betonozása között 48 órás szünet van (függőleges sík, az 5.25. ábrán c jelű)



5.40. ábra. A hőmérséklet időbeni alakulása a 10. példában. A rétegek betonozása között 24 órás szünet van (függőleges középsík, az 5.25. ábrán c jelű)



5.41. ábra. Hőmérséklet-eloszlás a függőleges középsíkban

e) A napsugárzás és a hőmérséklet hatása

Az a körülmény, hogy nem a nyári melegben (betonhőmérséklet 25 °C), hanem őszi időben (betonhőmérséklet 10 °C) való betonozást tételeztünk fel, csökkentti a $\sigma_{ct, max}/f_{ct}$ arányt:

	$\sigma_{ct, max}$	f_{ct}	Viszonyszám
1. példa	1,24	0,57	2,18
7. példa	0,53	0,34	1,56

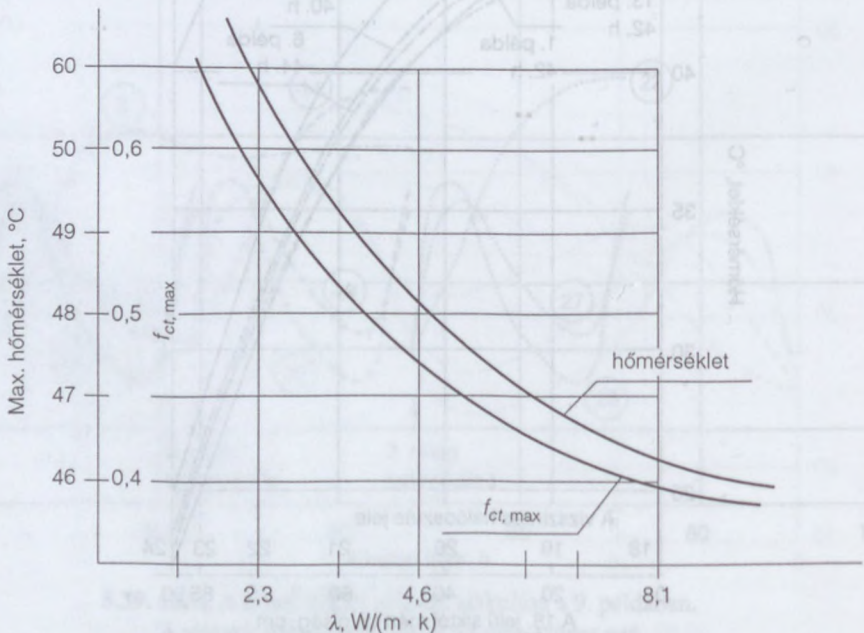
f) A beton hővezetési tényezőjének a szerepe

A 11., a 17. és a 18. példák összehasonlításából lehet következtetni a beton hővezetési tényezőjének változása okozta hatásra.

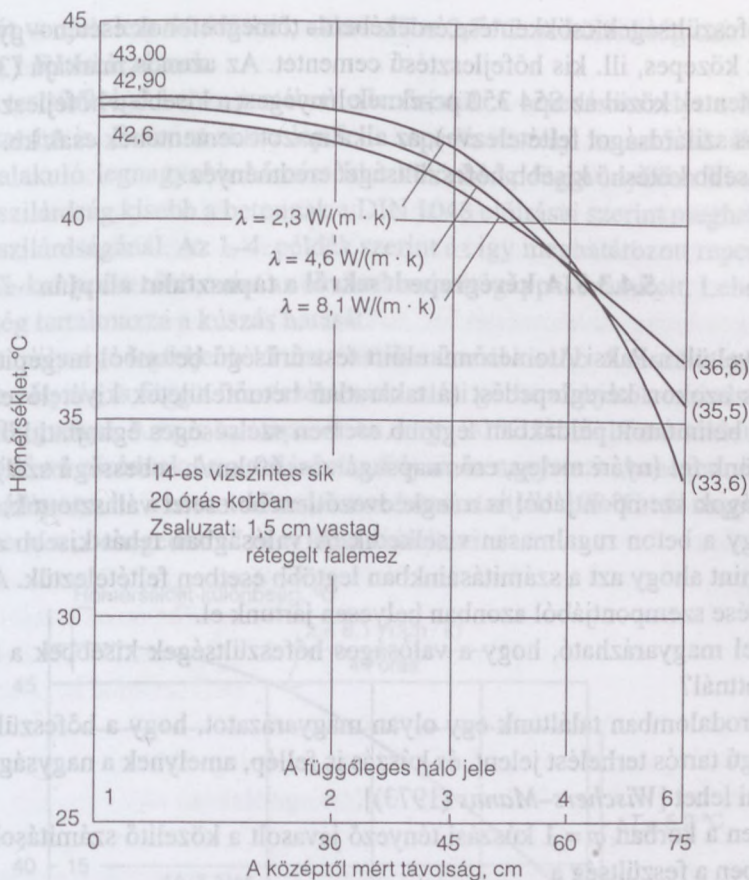
Az 5.42. ábrából és az 5.17. táblázatból látható, hogy a beton maximális hőmérséklete λ növekedésével kismértékben csökken, csökken a keletkező hőfeszültség is. Az 5.43. ábra szerint csökkenésével megváltozik a hőmérsékleti görbe alakja.

5.17. táblázat. A hővezetési tényező hatása a hőmérsékleti feszültségre

Példa	λ , W/(m · K)	Beton kora, óra	$\sigma_{ct, max}$, MPa	f_{ct} , MPa	T_{max} , °C
11	8,1	20	0,41	0,23	46
17	4,65	20	0,51	0,23	47,4
18	2,3	20	0,64	0,23	49,6



5.42. ábra. λ hatása a max. hőmérsékleti feszültségekre



5.43. ábra. λ hatása a hőmérséklet-closzlásra

A fiatal betonban nem állandó a hővezetési tényező. Előírt testsűrűségű betonban – nem állandósult hőáramban – 3,6–3,2 értékeket mértünk. Ez egybevág tömegbetonokon kapott mérési eredményekkel. A számítás során azért vettük fel a $\lambda = 4,6$ értéket, mert ebben az esetben egyeztek meg a számított és a mért hőmérsékletek. Az eltérést valószínűen a vasalás okozta.

Nehézbeton hővezetési tényezőjére 6,3–5,6 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ -t kaptunk. A 11–16. példákat $\lambda = 8,1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ -nel számítottuk. A kisebb λ -ák esetén a hőfeszültségek tehát kis mértékben nőnek.

g) A cement hidratációhőjének a hatása

A hőmérsékleti feszültségek szempontjából legnagyobb szerepe a cementnek van. Az építkezéshez és a kísérlethez felhasznált beremendi ppc 10 cement – előző évi kísérleteink szerint – kötэшő szempontjából a közönséges portlandcementek közé tartozik, amelynek 7 napos kötэшője kb. 293 J/g. A hazai cementek között ez a cement a nagyobb hőfejlesztésűek közé tartozik (felülről a negyedik).

4) A hőfeszültségek csökkentése érdekében – tömegbetonok esetén – gyakran alkalmaznak közepes, ill. kis hőfejlesztésű cementet. Az azonos márkájú (350-es) portlandcementek közül az S54 350 pc-eknek lényegesen kisebb a hőfejlesztése (azonos 28 napos szilárdságot feltételezve), az alkalmazott cementének csak kb. a kétharmada. A kisebb kötőhő kisebb hőfeszültséget eredményez.

5.4.3.5. A kéregrepedésekről a tapasztalat alapján

Megfigyeltük a Paksi Atomerőmű előírt testsűrűségű betonból megépített vasbeton falait és azokon kéregrepedést (a takaratlan betonfelületek kivételével) alig találunk. A bemutatott példákban legtöbb esetben szélsőséges éghajlati körülményeket tételeztünk fel (nyári meleg, erős napsugárzás, 60 km/h sebességű szél). A betontulajdonságok szempontjából is a legkedvezőtlenebb esetet választottuk, nevezetesen azt, hogy a beton rugalmasan viselkedik. A valóságban tehát kisebb a repedésveszély, mint ahogy azt a számításainkban legtöbb esetben feltételeztük. A tendenciák megítélése szempontjából azonban helyesen jártunk el.

Mivel magyarázható, hogy a valóságos hőfeszültségek kisebbek a fenti módon számítottnál?

Az irodalomban találtunk egy olyan magyarázatot, hogy a hőfeszültség változó nagyságú tartós terhelést jelent, és kúszás is fellép, amelynek a nagyságát legfeljebb becsülni lehet [Wischers–Manns (1973)].

Ebben a korban $\varphi = 1$ kúszási tényező javasolt a közelítő számításokhoz. Ebben az esetben a feszültség a

$$\sigma_{\sigma, \max} = \alpha \cdot \Delta T \cdot \frac{E_{0,c}}{1 + \varphi}$$

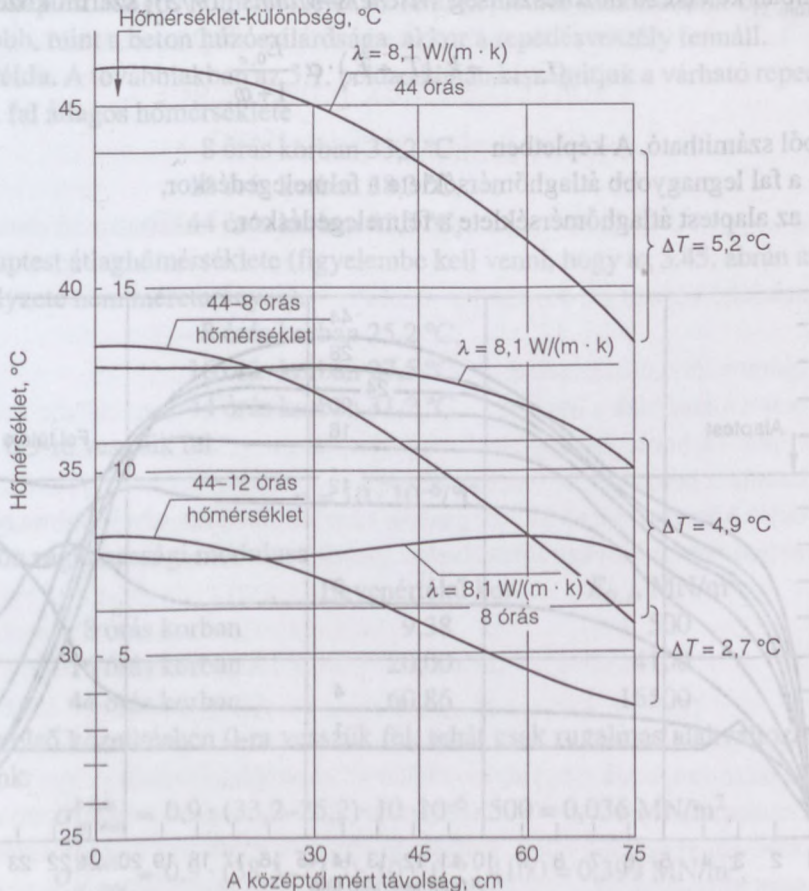
képletből számolva éppen a felére csökken.

Kutatásaink alapján egy másik magyarázatot is el tudunk képzelni (nem tagadva a kúszás lehetséges voltát) és ezt az 5.44. ábrával magyarázzuk. Felrajzoltuk az 1. példa alapján a hőmérséklet-eloszlást a 8., a 12. és a 44. órában. 8 óras korban megnövekedett már a beton hőmérséklete a frissbeton hőmérsékletéhez képest, de még alig van a keresztmetszet mentén hőmérséklet-különbség. 12 óras korra viszont már jelentős a hőmérséklet-különbség, majd eközben tovább nő. A beton a kötés idején még képlékeny, a hőmérséklet-változásra anélkül alakváltozik, hogy benne feszültségek lépnének fel. Azt csak a tömegbetonban elvégzett alakváltozás-mérésekkel lehet eldönteni, hogy hány óras korban keletkeznek a gátolt alakváltozások. Megítélésünk szerint a tetszőleges időpontban kialakuló hőmérsékletből le kell vonni azt a hőmérsékletet, amelynél a gátolt alakváltozások megkezdődnek. Példánkban (5.44. ábra) 44 óras korban $\Delta T = 5,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Ha a 44 óras hőmérsékleti görbéből kivonjuk a 8 óras hőmérsékleti görbét, akkor $\Delta T = 4,9 \text{ }^\circ\text{C}$, tehát alig csökkent. Ha viszont a 12 óras hőmér-

séketi görbét vonjuk le a 44 órásból, akkor $\Delta T = 2,7 \text{ }^\circ\text{C}$. A különbség már nagy és megfelel $\varphi = 1$ feltételezésnek.

Az előírt testsűrűségű beton esetében ellenőriztük a repedésveszélyt a RILEM-irányelvek szerint is. Eszerint akkor lép fel a repedésveszély, ha az 5.32. ábrából a betonban kialakuló legnagyobb hőmérséklet-különbség függvényében kiszámított hajlító-húzószilárdság kisebb a betonnak a DIN 1048 előírásai szerint meghatározott hajlító-húzószilárdságánál. Az 1–4. példák szerint az így meghatározott repedési veszély kb. 25%-kal kedvezőbb, mint az általunk számítógéppel számított. Lehet, hogy ez a különbség tartalmazza a kúszás hatását.

A repedés mélysége legfeljebb 15 cm, általában ennél kisebb. A feszültségi ábra és így a repedésmélység is függ a hőmérséklet-eloszlási görbe alakjától, ami elsősorban a vastagság függvénye. Arra is van tapasztalat, hogy $20 \text{ }^\circ\text{C}$ körüli hőmérsékleten ezek a repedések idővel záródnak és a szilárdulás folyamán nagyrészt „behegednek”. Különösen fennállhat ez, ha a betont állandóan nedvesen tartják. $100 \text{ }^\circ\text{C}$ -nál nagyobb hőmérsékleten erre a „behegedésre” nem lehet számítani.



5.44. ábra. A korrigált hőmérsékleti ábrák

5.4.3.6. Az átmenő repedések veszélyének számítása

A betonfalat általában merev alaptestre építik, amelynek a hőmérséklete rendszerint már a betonozáskor is eltér a frissbeton hőmérsékletétől. A hidratáció hő miatt később a beton hőmérséklete nő és a fal tengelyvonalában pl. az 5.45. ábra szerinti hőmérsékleti görbék alakulnak ki. A legnagyobb hőmérséklet a fal középpontjában van, míg az alaptest és a szabad felszín felé csökken a hőmérséklet. A fal hőmérséklete növekedésekor néhány óráig a fal feszültség nélkül alakváltozik. Amikor a beton szilárdulni kezd, akkor benne olyan mértékben alakulnak feszültségek, amilyen mértékben az alakváltozást meggátoljuk. Ha a fal lehül az alaptest hőmérsékletére, akkor benne – mivel az alaptestnél az alakváltozást nagyrészt meggátoljuk – kényszerfeszültségek keletkeznek. Éspedig a falban húzó-, az alaptestben nyomófeszültségek.

Mivel az átmenő repedéseknek a helyszíni kísérlet útján való tanulmányozása igen költséges lett volna, ezért ezt csak az irodalom, valamint a gépi számítás eredményeinek a felhasználásával tanulmányoztuk.

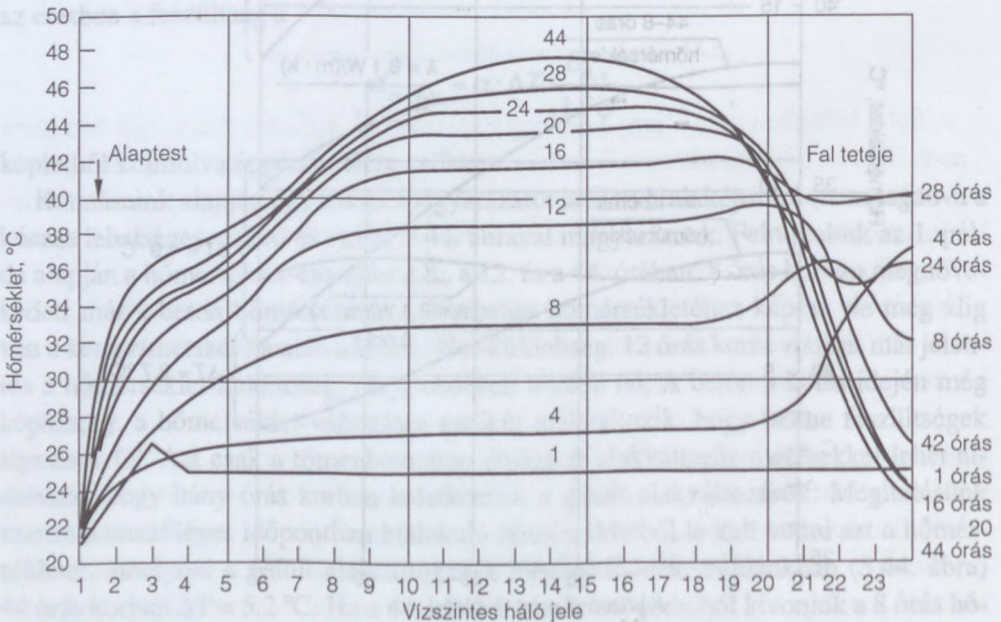
A falban keletkező húzófeszültség [Wischers–Manns (1973)] szerint közelítően a

$$\sigma_{ct, max} = k \cdot (T_2 - T_1) \cdot \alpha \cdot \frac{E_{0,c}}{1 + \varphi}$$

képletből számítható. A képletben

T_2 a fal legnagyobb átlaghőmérséklete a felmelegedéskor,

T_1 az alaptest átlaghőmérséklete a felmelegedéskor,



5.45. ábra. Függőleges irányú hőmérséklet-eloszlás az 1. példa esetében a fal tengelyvonalában

- $E_{0,c}$ a beton húzási rugalmassági modulusa, melyet a nyomási rugalmassági modulussal veszünk azonosnak,
 α a beton hőtágulási együtthatója,
 φ a kúszási tényező, amire megbízható adat nem áll rendelkezésre,
 k tényező a fal és az alaptest közti elcsúszás lehetősége (görgők feltételezése esetén nulla), az alap és a fal keresztmetszetének a viszonya és ezek rugalmassági modulusa befolyásolja. k értéke sziklatalaj esetén 1-gyel egyenlő, és általában 0,8-nál nagyobb.

A megrepedés mechanizmusa a következő: A fal végén a fal tengelyével párhuzamosan a húzófeszültség nulla. A húzófeszültség ezután a fal tengelye mentén haladva mindaddig nő, amíg eléri a beton húzószilárdságát. Ezen a helyen tehermentesítő repedés keletkezik a fal tengelyére merőleges síkban. Ez a jelenség ismétlődik, és ezzel magyarázható a többnyire szabályos repedéstávolság.

A gépi hőmérséklet-számítás alapján felrajzoltuk a fal hőmérséklet-eloszlási ábráját a függőleges szimmetriasíkban (pl. 5.25. ábra). Planiméterrel meghatároztuk a fal és az alaptest átlagos hőmérsékletét, és fenti képletből számítottunk $\sigma_{ct,max}$ -t. Ha ez nagyobb, mint a beton húzószilárdsága, akkor a repedésveszély fennáll.

5.2. Példa. A továbbiakban az 5.1. példa alapján kiszámítjuk a várható repedésveszélyt. A fal átlagos hőmérséklete

8 órás korban 33,2 °C,

16 órás korban 38,3 °C,

44 órás korban 41,5 °C,

Az alaptest átlaghőmérséklete (figyelembe kell venni, hogy az 5.45. ábrán az 1.-8. síkok helyzete nem méretarányos).

8 órás korban 25,2 °C,

16 órás korban 27,5 °C,

44 órás korban 31,2 °C.

k értékét 0,9-re vesszük fel:

$$\alpha = 10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}.$$

A beton rugalmassági modulusa

Egyenértékű kor	$E_{0,c}$, MN/m ²
8 órás korban	9,38 500
16 órás korban	20,00 4100
44 órás korban	60,86 16500

φ értékét első közelítésben 0-ra vesszük fel, tehát csak rugalmas alakváltozásokkal számolunk:

$$\sigma_{ct,max}^{8 \text{ órás}} = 0,9 \cdot (33,2 - 25,2) \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 500 = 0,036 \text{ MN/m}^2,$$

$$\sigma_{ct,max}^{16 \text{ órás}} = 0,9 \cdot (38,3 - 27,5) \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 4100 = 0,399 \text{ MN/m}^2,$$

$$\sigma_{ct,max}^{44 \text{ órás}} = 0,9 \cdot (41,5 - 31,2) \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 16500 = 1,53 \text{ MN/m}^2.$$

Ugyanilyen korú beton húzószilárdsága

$$8 \text{ óras korban } f_{ct} = 0,01 \text{ MN/m}^2,$$

$$16 \text{ óras korban } f_{ct} = 0,12 \text{ MN/m}^2,$$

$$44 \text{ óras korban } f_{ct} = 0,50 \text{ MN/m}^2.$$

Az átrepedés veszélye tehát ebben az esetben fennáll. Ha feltételezzük, hogy $\varphi = 1$, akkor

$$\sigma_{ct, \max}^{8 \text{ óras}} = 0,018 \text{ MN/m}^2 > f_{ct} = 0,01 \text{ MN/m}^2,$$

$$\sigma_{ct, \max}^{16 \text{ óras}} = 0,200 \text{ MN/m}^2 > f_{ct} = 0,12 \text{ MN/m}^2,$$

$$\sigma_{ct, \max}^{44 \text{ óras}} = 0,765 \text{ MN/m}^2 > f_{ct} = 0,50 \text{ MN/m}^2.$$

A repedésveszély még ebben az esetben is fennáll. Hangsúlyozzuk azonban, hogy a példában szélsőséges eseteket tételeztünk fel.

5.5. A tömegbetonban kialakuló repedésveszély csökkentésének lehetőségei

[Balázs–Erdélyi–Weiss (1968)]

5.5.1. A csökkentés lehetőségei általában

A hidratációhő okozta károsodásokat alábbi módszerekkel lehet csökkenteni (megelőzni):

- a hidratációhő csökkentése,
- a beton alkotóinak a hűtése,
- az építéstechnológia megfelelő megválasztása,
- a beépített beton hűtése (esetleg fűtése),
- a belső hőmérséklet alakulása a beton külső felületének a hővédelme révén.

Továbbiakban az idevágó főbb elveket foglaljuk össze.

5.5.2. A hidratációhő csökkentése

[Balázs–Erdélyi–Horváth–Opotzky–Zimonyi (1968)]

Két módszere van, amiket egyidejűen lehet alkalmazni.

1. *A cementmennyiség csökkentése.* Akkor oldható meg, ha az adalékanyag legnagyobb szemmagyságát növeljük. Külföldön 150 mm legnagyobb szemmagyságú adalékanyagot is használtak. A cementmennyiség ebben az esetben 150 kg/m^3 -re, sőt 125 kg/m^3 -al csökkenthető volt. Hazánkban a Dunakiliti Duzzasztó építésében csak

64 mm legnagyobb szemnagyságú, természetes aprózódású adalékanyagot találtunk, nagyobbat nem. A cementtartalom csökkentésének a lehetőségét az adja meg, hogy a legnagyobb szemnagyság növelésével csökken a péptelítettséghez szükséges cement mennyisége.

2. *Kis hidratációhőjű cementek felhasználása.* A tiszta portlandcementek közül a legkisebb hidratációhője a CEM I 32,5S jelű, szulfátálló (korábbi jele S54 350 pc volt) cementnek van. A Paksi Atomerőmű Átmeneti Hulladéktárolója építéséhez nem a szulfátállósága miatt használtuk a szulfátálló cementet, hanem azért, mert kicsi a hidratációhője.

Az 5.10. ábrából jól látható, hogy heterogén portlandcementeknek annál kisebb a hidratációhője, minél nagyobb a hidraulikus pótlék tartalma.

Jó közelítéssel azt mondhatjuk, hogy a savanyú hidraulikus pótlékok (trasz, pernye, szilikapor) cementbeni mennyiségével arányosan (20% esetén 20%-kal), míg a kohósalak-tartalom esetén fele arányban (40% kohósalak, 20% hidratációhő csökkenés) csökken a hidratációhő.

Kötéskésleltető adalékszerrel csökkenteni lehet a hidratációhő felszabadulásának a sebességét, ami a repedésveszély csökkenéséhez vezethet.

5.5.3. A beton alkotóinak hűtése

A frissbeton hőmérséklete (T_b) az alapanyagok hőmérsékletéből, mennyiségéből és fajhőjéből a következőképpen számítható:

$$T_b = \frac{A \cdot c_a \cdot T_a + C \cdot c_c \cdot T_c + W \cdot c_w \cdot T_w}{A \cdot c_a + C \cdot c_c + W \cdot c_w} \text{ (}^\circ\text{C)},$$

ahol A az adalékanyag mennyisége, kg/m^3 ;

C a cement mennyisége, kg/m^3 ;

W a víz mennyisége, kg/m^3 ;

c_a az adalékanyag fajhője, kb. 0,2 (kcal/kg $^\circ\text{C}$);

c_c a cement fajhője, kb. 0,2 (kcal/kg $^\circ\text{C}$);

c_w a víz fajhője, kb. 1 (kcal/kg $^\circ\text{C}$);

T_a az adalékanyag hőmérséklete, $^\circ\text{C}$;

T_c a cement hőmérséklete, $^\circ\text{C}$;

T_w a víz hőmérséklete, $^\circ\text{C}$.

Mint hogy a víz fajhője kereken ötször akkora, mint a cementé, és az adalékanyagé, fenti képlet egyszerűsített alakja a:

$$T_b = \frac{A \cdot T_a + C \cdot T_c + 5W \cdot T_w}{A + C + 5W} \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

Ebből az egyenletből kitűnik, hogy az alapanyagok hűtése – illetve, ellenkező esetben melegítése – különböző hatású. Átlagos viszonyok között a frissbeton hőmérsék-

lete 1 °C-kal csökkenthető, ha a cement hőmérsékletét 10 °C-kal, vagy az adalékanyagokét 1,6 °C-kal, vagy a vizét 3,6 °C-kal csökkentjük. A legkisebb hatású a cement hűtése. Egy forró, pl. 60 °C-os cement lehűtése 30 °C-ra – egyébként azonos körülmények között – a friss beton hőmérsékletét 3 °C-kal csökkenti. Legegyszerűbben hűthető a keverővíz, erre azonban csak az a víz használható fel, melyet az adalékanyag nedvességtartalmán felül adunk a betonhoz. Leghatásosabb az adalékanyagok hűtése.

Nyári napokon előnyös a durva adalékanyag permetezése hideg vízzel. Hűtésre használhatunk 1 cm-nél kisebb jégdarabokat is.

Figyelembe veendő a jég kis hőmérsékletén kívül nagy olvadási hője is (80 kkal/kg). Kb. 8 kg jég a frissbeton hőmérsékletét 1 °C-kal csökkenti. A jég olvadjon el a keverőgépben, mert ellenkező esetben a jég helyén a betonban vízzel telített üregek, majd hézagok maradnak.

Az adalékanyag hűthető (*Rogalin*, 1965)

- hideg vízzel,
- hideg levegővel,
- vákuumban.

Az előzőekben rámutattunk arra, hogy csak a keverővizet nem érdemes hűteni. A továbbiakban az adalékanyag vízhűtési technológiai kérdéseit ismertetjük.

Az adalékanyag hűtése hideg vízzel, bár energetikai szempontból előnyös, és viszonylag kis hűtőberendezést igényel, azonban számos hibája van. Ezek a következők:

- a) Ez a módszer nem teszi lehetővé, hogy jelentősen (10 °C alá) lehűtsük a betonkeveréket, minthogy a víz minimális hűtési hőmérsékletén (2 °C) nem képes a durva adalékanyagot 5 °C alá hűteni, és nem használható fel a homok hűtésére, túlzott nedvesítése miatt.
- b) A vízzel hűtött durva adalékanyag erősen nedvesítve jön ki, ami az anyag járulékos víztelenítő rostálását teszi szükségessé. Azonban, mint az Orgenergosztroj Intézet által végzett kísérletek mutatták, még 2 perces víztelenítés után is rázórostákon az 5–10, illetve 10–20 mm frakciójú nedves zúzalék végső nedvességtartalma 3, illetve 2% maradt. Az adalékanyag járulékos nedvesedése megnehezíti a keverővíz adagolását, és a betonkeverék minőségének csökkenésével járhat.
- c) Hibája, hogy a hűtési folyamat periodikus.
- d) Nagy befogadóképességű tartályokra, víztelenítő rostákra, hideg és használt víz-csővezetésekre, iszapülepítő kamrákra stb. van szükség.
- e) Az a vélemény, miszerint e módszer esetén kedvező, hogy egyúttal az anyagok mosása is végbemegy ezzel a módszerrel, hibás, minthogy a berendezések üzemeltetési tapasztalata azt mutatta, hogy a durva adalékanyagot gondosan meg kell mosni a hűtőtartályba rakás előtt, ellenkező esetben a bennük hűtött (és nedvesített) adalékanyag nem használható fel betonkeverék készítésére, mivel nagy mennyiségű iszap ülepszik le benne.

Ez a berendezés felhasználható télen a beton *melegítésére* is, azonban a fűtés hatásfoka igen kicsi (30–40%), több beruházást igényel, nem lehet vele a homokot melegíteni, mert túlzottan nedves, holott télen elsősorban ezt kell melegíteni, mert jobban ki van téve a fagyhatásnak, mint a durva adalékanyag.

Mindezeket figyelembe véve az adalékanyag vízűtésének a költsége kb. a hideg levegős hűtés költségével egyezik meg.

Az adalékanyag hűtése hideg levegővel nehézkes és bonyolultan üzemeltethető hűtőberendezés alkalmazását teszi szükségessé, viszonylag nagy mennyiségű kompresszorral, nagy méretű és tömegű léghűtőkkel, viszonylag nagy villamosenergia- és levegőfogyasztással, nagyteljesítményű fűvógépekkel. Azonban ez a módszer lehetővé teszi a durva adalék alacsony (10 °C alatti) hőmérsékletre hűtését, és a homok viszonylagos mélyhűtését. Az anyag eközben kissé kiszárad, ami megkönnyíti a keverővíz adagolását, és lehetővé teszi a betonkeverék minőségének javítását. Az adalékanyagok hűtése folytonos. Az anyag hűtési mérve könnyűszerrel szabályozható a légfogyasztás változtatása révén.

A hideglevegős hűtésre szolgáló berendezés télen felhasználható az adalékanyag füstgázokkal való melegítésére. A hideg levegős hűtésnek kombinált módszereit is használják.

Az USA-ban használták az adalékanyagok vákuumhűtését. Az adalékanyagot jól záró tartályba helyezik és abból mélyvákuummal (4–6 mm higanyoszlop) kiszívják a levegőt. Ezáltal tetszőlegesen hűthető, és egyúttal az adalékanyag víztelenítése is bekövetkezik.

A betonkeverék hűtése jéggel igen hatásos: 8 kg jég 1 m³ betonkeverék hőmérsékletét 1 °C-kal csökkenti. Azonban, mivel az adagba korlátozott mennyiségű jeget szabad tenni, a betonkeverék hőmérséklete max. 8–9 °C-kal csökkenthető.

A betonkeverék hőmérsékletének fenti csökkenése abban az esetben lehetséges, ha a szabad keverővizet teljes egészében jéggel helyettesítik, azonban ez csak úgy valósítható meg, ha a jeget a betonkeverőbe rakása előtt nagymértékben felaprítják (40 mm-nél kisebb szemcsékre), és ha az adalékanyagok hőmérséklete elég nagy (legalább 20 °C), úgyhogy keveréskor biztosítva legyen a jég teljes feloldódása a betonkeverőben. Azonban a jég méretének csökkentésekor nő az oladási veszteség, és nagymértékben romlanak a szállítási és tárolási viszonyok. A betonkeverék hűtése e módjának számos jelentős fogyatékosága van:

a) A betonkeverékben a betonkeverőben való keverési időtartamát 2,5–3 percre kell növelni, míg a jég teljesen megolvad. Ezáltal jelentős mértékben csökken a betongyár termelékenysége a betonmunkákra legkedvezőbb nyári hónapokban.

b) Bonyolult berendezést kell felhasználni a jég előállítására, szükség van tárolóbunkerekre, szállítóeszközökre, jégadagolókra, hideg levegőre a jég hűtéséhez és szárításához, megakadályozva azt, hogy a jégdarabok befagyjanak a bunkerekbe és jégvezetékekbe (ami ismét hűtőkompresszorok felállítását teszi szükségessé, más segédberendezéssel, léghűtővel, fűvógéppel).

A felsorolt fogyatékoságok ellenére külföldön elterjedt a jég alkalmazása a betonkeverék hűtésére. Ezt a hűtési módot más módokkal egyidejűleg is alkalmazzák. A Szovjetunióban a jéggel hűtés 2,5-szer olyan drága volt, mint a betonkeverék hűtése levegővel.

5.5.4. A beton belső csőhűtése

[Wischers, (1964)]

Az eljárás lényege az, hogy hosszú csöveket betonoznak be, amelyen keresztül hideg vizet szivattyúznak, mely a betont hűti. A csőhűtést az USBR dolgozta ki, és először a 20-as évek végén a Boulder gát építésénél próbálták ki. A hűtőrendszer teljesítményét befolyásolja:

- a csövek egymástóli távolsága,
- a csövek átmérője,
- egy csőkiyó hossza,
- a hűtővíz hőmérséklete,
- az átfolyó víz sebessége és mennyisége, továbbá
- a csőfal és a beton hővezetési tényezője.

A hűtés szempontjából leglényegesebb a csövek egymás közti távolsága, mellyel a hatásfok négyzetesen változik. Kétszeres távolságban elhelyezett csövek négyszer annyi idő alatt végzik el ugyanazt a hűtést. A csövek függőleges távolságát a rétegvastagság határozza meg 1,5–2,0 m-ben. A hűtőhatást a csőkiyón belül az egyes csövek távolságával szabályozzák. A csőátmérő hatása nem nagy. A hűtőhatás megkétszerezése érdekében egyébként azonos körülmények között 10-szeres átmérőre van szükség. A kedvező csőátmérő hidraulikus okokból (vezeték-ellenállás) és gazdasági megfontolásokból adódik ki. Az USA-ban az egy 1"-os cső átmérőt (külső) tekintették gazdaságilag optimálisnak. Ott legalább 1,5 mm falvastagságú fémcsöveket használnak. A csőkiyón átáramló víz felmelegszik. A hűtőteljesítmény tehát a csőkiyó hosszával csökken. Az USBR maximálisan 400 m hosszú csőkiyót engedett meg, rendszerint azonban kb. 200 m hosszú csőkiyót alkalmaznak. Nagy hálózatoknál több helyen alkalmaznak 75 mm átmérőjű függőleges hozzávezető csöveket. Ezeket 200 mm átmérőjű fővezeték táplálja. A beton a csőkiyó elejénél a hidegebb víz következtében jobban lehül, mint a végénél, emiatt a hűtővíz áramlási irányát naponta változtatják. Az USBR előírásai szerint minden egyes csőkiyót betonozás előtt 3,5 atm nyomású vízzel kell kipróbálni. Ez a kikötés túl szigorúnak látszik, mert még nagy görbületeknél is 1 atm-nál kisebb nyomással lehet a megkívánt áramlási sebességet biztosítani. Ezen felül a megszilárdult betonban a tömítetlenség sem okoz zavart, csak a frissbetonban okozhat kárt. Nagy hatása van a hűtővíz hőmérsékletének. A hűtőteljesítmény egyenesen arányos a betonhőmérséklet és a hűtővíz hőmérséklet-különbségével. Tehát a csövek egymásra való távolságán kívül a hűtővíz hőmérsékletének van a hűtőteljesítményre a legnagyobb hatása.

A hűtővíz olyan gyorsan áramoljon a csöveken át, hogy turbulens mozgás jöjjön létre, minthogy lamináris mozgás esetén – a rossz hővezetés következtében – a hűtőteltjesítmény 25%-kal csökken. 25 mm belső átmérőjű csőnél az áramlási sebesség legalább 12,7 cm/s, 50 mm belső átmérőjű csőnél legalább 6,3 cm/s legyen. Ennek 25 mm átmérőjű csőnél 3,9 lit/min és 50 mm-es csőnél 7,8 lit/min átfolyó vízmennyiség felel meg. Az átfolyó vízmennyiség növekedésével nő a hűtőteltjesítmény, azonban nem lineárisan, hanem parabolikusan és egy bizonyos hűtőteltjesítmény maximum létezik, mely tetszőlegesen nagy átfolyó vízmennyiség esetén sem léphető túl. Az átfolyó vízmennyiséggel nőnek a szivattyúzás és az installáció költségei, ezért gazdaságos optimumot kell keresni. Az USBR 1"-os külső átmérőjű csöveknél legalább 15 lit/min vízmennyiséget ír elő, amit a gyakorlatban jelentősen nem lépnek túl. Az 1,5 mm vastag csőfal hővezetési tényezője gyakorlatilag nem befolyásolja a hűtőteltjesítményt, ha fémcsöveket (acél, alumínium) használnak. Műanyag csövek nem ajánlhatók, kedvezőtlenebb hővezetésük miatt.

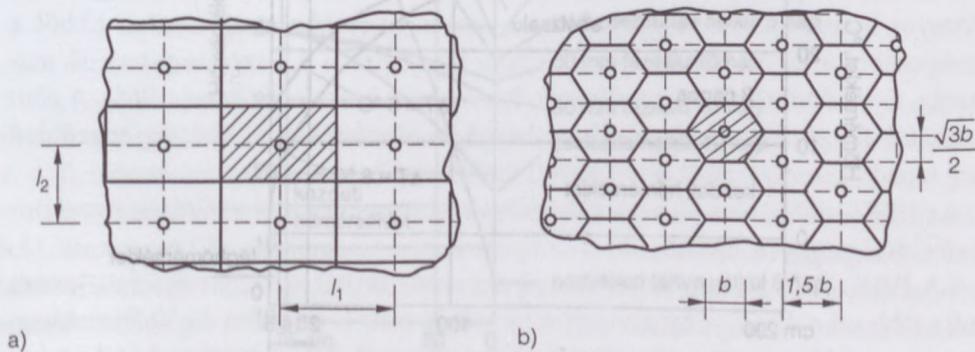
Az USA-ban alumíniumcsöveket vagy alumíniumtömlőket használnak. Ezeket a csöveket tekercsekben szállítják, és a sok munkaiányes csökötés elmarad. A beépített alumíniumcső a betonban tönkremegy (elrozdásodik), ennek azonban a műtárgy szempontjából nincs jelentősége.

Megjegyzem, hogy a felmenő fal és az alaptest hőmérsékletének a különbsége úgy is csökkenthető, hogy az alaptestet melegítjük. Hátránya, hogy a csöveket az alaptest betonozása előtt be kell építeni.

5.5.5. A csővezetékes hűtőrendszer számítása

A hűtőrendszerek tervezéséhez nomogramokat dolgoztak ki [Stucky és Derron, Wischers (1964) Danilova és Bucsko (1965) stb.].

A csővezetékkel ellátott tömör betontömb úgy tekinthető, mint egy sor négy- vagy hatszögletű oldallappokkal határolt prizma, amelyek közül mindegyiket egy-egy külön



5.46. ábra. A hűtőcsövek elhelyezése

a) derékszögű négyzögű osztásban; b) hatszögű osztásban

csővezetékek hűt (5.46. ábra). A hűtés igen egyenletes, ha a csővezetéket oly módon fektetik, hogy az egy-egy külön csővel hűtött betonprizma keresztmetszete szabályos hatszög. E célból a csöveket sakktablászzerűen célszerű beágyazni (5.46. ábra).

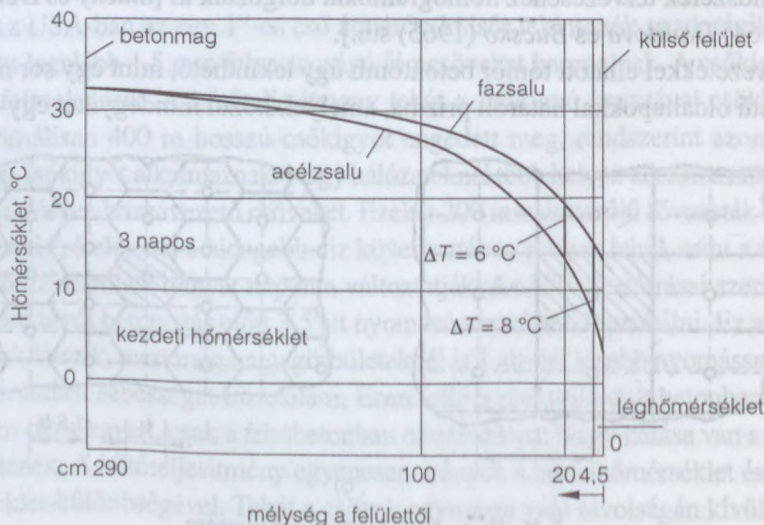
5.5.6. A hőmérséklet okozta feszültségek csökkentése a betonfelület védelmével

A repedésképződés oka a beton belseje és külső felülete közötti nagy hőmérsékletesés. A védekezésnek is egyik módja lehet a betonon belüli hőmérséklet-különbség csökkentése a blokk felületén elhelyezett védőréteg révén. (Meleg éghajlatú vidéken, vagy nagy melegben az is előfordul, hogy a rétegeket – fogásokat – minél előbb átfedik hűtött frissbetonnal, hogy az alatta lévő ne melegedjék túlságosan hamar (pl. Oroville gát építése).

A fiatal korú betonban a repedések meggátlásának módja akár alkalmazunk belső hűtést, akár nem:

- a) fazsaluzat vagy más hasonló, hőszigetelő jellegű zsalufajta alkalmazása,
- b) a zsaluzás időtartamának meghosszabbítása a megfelelő mértékben,
- c) a nedvesen tartás elhagyása.

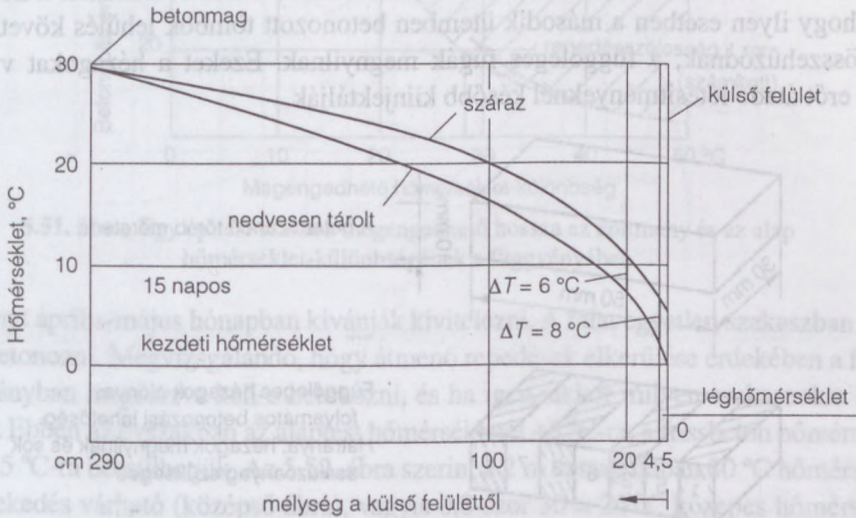
A zsaluzatot úgy kell megválasztani, hogy a betonmag és a betonfelület között 20 °C-nál nagyobb hőmérséklet-különbség ne legyen. Nagyobb a hőmérsékletesés vaszsaluzat, mint fazsaluzat esetén (5.47. ábra), nedvesen tartott betonban a száraz betonhoz képest (5.48. ábra). A zsaluzat és a nedvesen tartás hatását szemlélteti még az 5.49. ábra. A betontömbön belüli megkívánt hőmérsékletesést fazsaluzattal teljesíteni lehet. A zsaluzatban tartás időtartamát úgy kell megválasztani, hogy elbontása



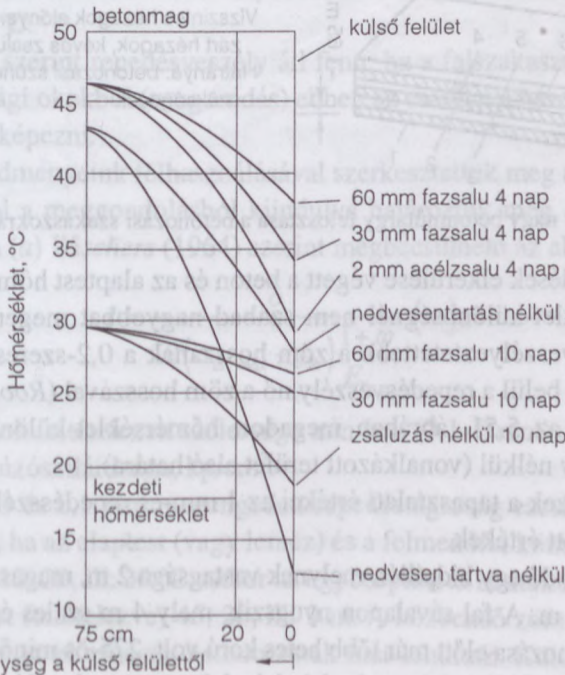
5.47. ábra. A zsalu hatása a hőmérsékletesésre

után káros hőmérsékletesés ne következzen be. Hampe (1942) szerint akkor szabad a zsaluzatot elbontani, ha a betonmag hőmérséklete a hidratációhő miatti hőmérséklet-növekedés maximumát elérte és utána egyharmadára süllyedt.

E kérdés tárgyalásánál az átlagos léghőmérséklet, valamint az új fogás frissbetonjának hőmérséklete figyelembe veendő, mint azt az Oroville-i példa is mutatja.



5.48. ábra. A nedvesen tartás hatása a hőmérsékletesésre

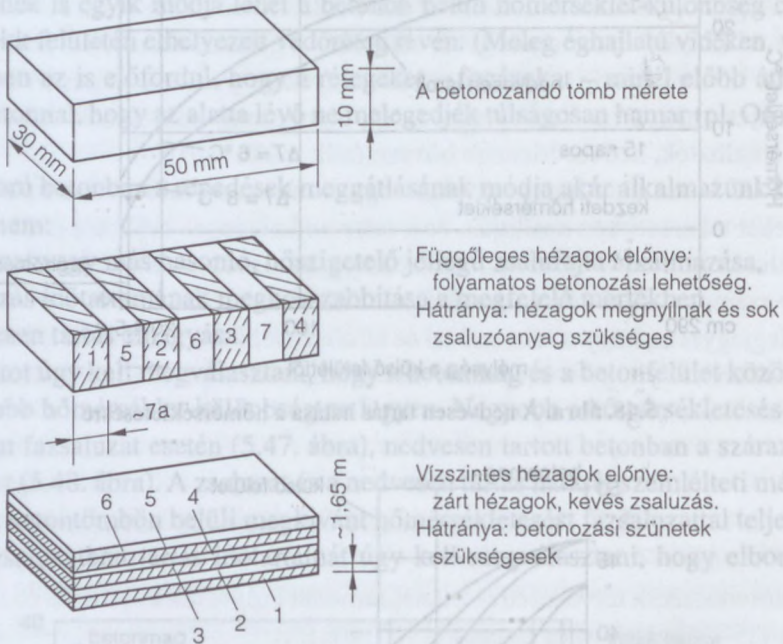


5.49. ábra. A zsaluanyag és a nedvesen tartás hatása a hőmérsékletesésre

5.5.7. Az építéstechnológia megfelelő megválasztása

A hőmérséklet csökkentésének két esete van szakaszos betonozás esetén (5.50. ábra).

1. Általában az *átmenő repedés* veszélyének a csökkentésére alkalmazzák a függőleges hézagokat, zömökben betonozásnak is nevezzük. Függőleges osztás választása esetén először minden második tömböt betonozzák és utána betonozzák a közöket. Minthogy ilyen esetben a második ütemben betonozott tömbök lehülés következtében összehúzódnak, a függőleges fugák megnyílnak. Ezeket a hézagokat vízzáró vagy erős átadó létesítményeknél később kiinjektálják.

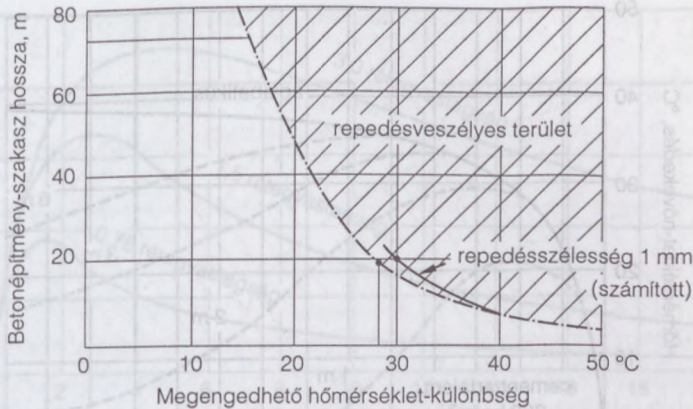


5.50. ábra. Egy nagy betonműtárgy felosztása a betonozási szakaszokra (zömökre)

Az átmenő repedések elkerülése végett a beton és az alaptest hőmérséklete között bizonyos hőmérséklet-különbségnél nem szabad nagyobbat megengedni. Ebből a szempontból a legveszélyeztetettebb a zöm hosszának a 0,2-szereséig terjedő magasság. Egy zömön belül a repedésveszély nő a zöm hosszával (Rood, 1965). A zöm hosszától függően az 5.51. ábrában megadott hőmérséklet-különbség engedhető meg repedésveszély nélkül (vonalkázott terület alsó határa).

Az USBR-nek ezek a tapasztalati értékei az 1 mm-es repedésszélesség figyelembevételével számított értékek.

5.3. Példa. Építendő egy hidpillér, melynek vastagsága 2 m, magassága 6 m, hossza pedig több mint 40 m. A fal sávalapon nyugszik, mely 4 m széles és 10,5 m vastag. A sávalap a fal betonozása előtt már több hetes korú volt. 275-ös minőségű (nálunk korábban kb. C 500-as) 50% salaktartalmú kohósalakcement adagolása 300 kg/m³. Az



5.51. ábra. Egy építési szakasz megengedhető hossza az építmény és az alap hőmérséklet-különbségének a függvényében

Építményt április-május hónapban kívánják kivitelezni. A falat egyetlen szakaszban tervezik betonozni. Megvizsgálandó, hogy átmenő repedések elkerülése érdekében a falat hosszirányban megosztva kell-e betonozni, és ha igen, akkor milyen szakaszokra kell osztani. Ebben az évszakban az alaptest hőmérsékletét $+8\text{ °C}$ -ra, a frissbeton hőmérsékletét $+15\text{ °C}$ -ra becsülhetjük. Az 5.52. ábra szerint a 2 m vastag falban 30 °C hőmérséklet-növekedés várható (középső ábra), vagyis $0,8\text{-szor } 30 = 24\text{ °C}$ közepes hőmérséklet-növekedés, valamint $15 + 24 = +39\text{ °C}$ középhőmérséklet a falban. (A mag csúcshőmérséklete $= 15 + 30 = +45\text{ °C}$.) A fal és az alaptest hőmérséklet-különbsége tehát $39 - 8 = 31\text{ °C}$.

Az 5.53. ábra szerint repedésveszély áll fenn, ha a falszakaszok 14 m-nél hosszabbak. Biztonsági okokból (zsugorodás) ebben az esetben a hézagokat 10–12 m-es távolságra kell kiképezni.

A kísérleti eredményeink felhasználásával szerkesztettük meg az 5.53. ábrát.

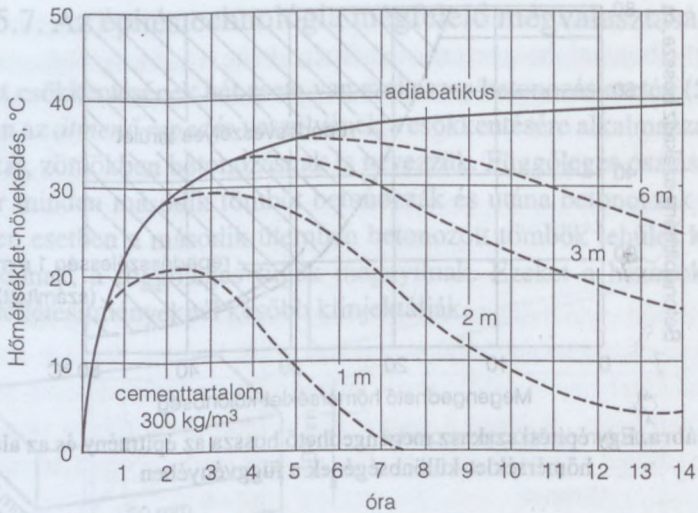
Az ábrát abból a megfontolásból kiindulva határoztuk meg, hogy a repedések várható távolsága (a) Wischers (1964) szerint megbecsülhető az alábbi képletből:

$$a = \frac{\delta}{10(\sigma_{ct, \max} - f_{ct}) \frac{1 + \varphi}{E_{0,c}}} \quad (\text{m}),$$

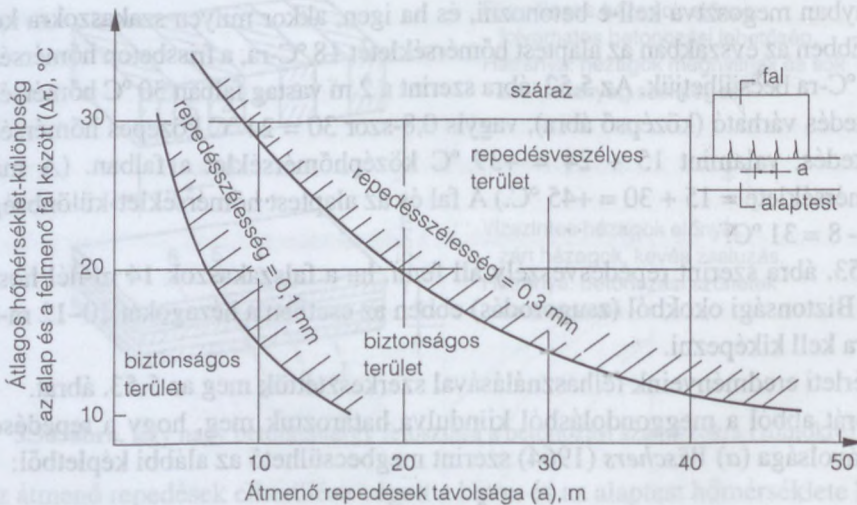
ahol δ a repedések feltételezett szélessége mm-ben (0,1–5 mm),

f_{ct} a beton húzószilárdsága, kp/cm^2 .

A számítást 0,3 és 0,1 mm megengedett repedéstágasság esetére elvégeztük. Az 5.53. ábra szerint, ha az alaptest (vagy lemez) és a felmenőfal közötti átlagos hőmérséklet-különbség 10, 20, ill. 30 °C , akkor az egybeépíthető zömök hossza (0,3 mm-es repedésszélességet feltételezve) 45, 20, ill. 9 m. A közbenső zömöket akkor szabad betonozni, amikor az előzetesen betonozottak már lehűltek. Különben a munkahézagban a lehülés során repedések léphetnek fel.



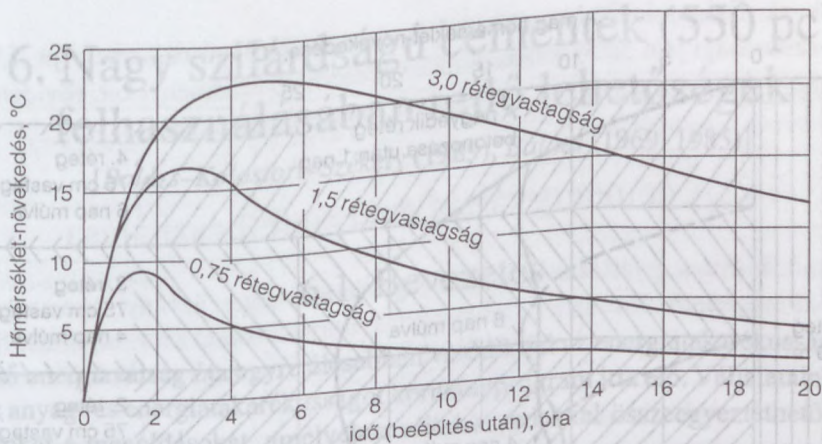
5.52. ábra. Különböző vastagságú betontestek magja hőmérsékletének az emelkedése



5.53. ábra. Segédlet a zömök méretének a meghatározásához

Ha a betonozást úgy végeztük, hogy a tömbök között függőleges osztóhézagok maradtak, akkor azokat ki kell injektálni. Az injektálás azonban csak akkor zár jól, ha a blokkok hőmérsékletét a műtárgy évi átlagos hőmérséklete alá 1–2 °C-kal lehűtjük. Ez a hőmérséklet az adott helyhez tartozó évi középhőmérsékletnek (levegő) felel meg és alig változik az időjárással. Ellenkező esetben, ha a beton a hidegben összehúzódik, repedések keletkezhetnek a blokkok csatlakozásánál. Ha csöveken vízzel is hűtötték a betont, akkor a hűtés befejeztével a csöveket is kiinjektálják.

A *kéregrepedés veszélyének* a csökkentésére általában a vízszintes hézagokat alkalmazzák.



5.54. ábra. A rétegvastagság hatása a réteg közepes hőmérsékletére

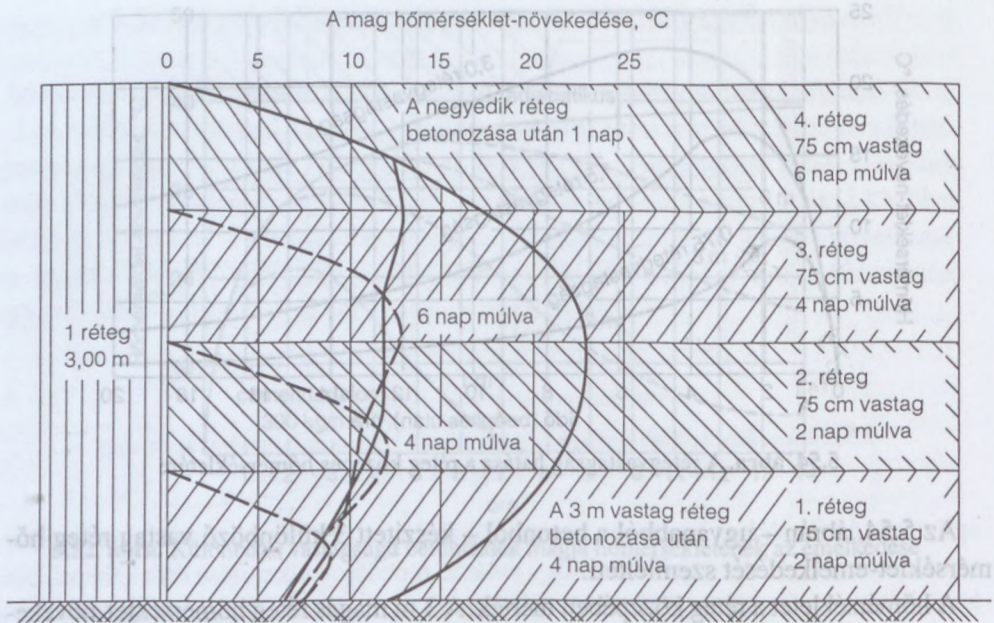
Az 5.54. ábrán – ugyanabból a betonból – készített 3 különböző vastag réteg hőmérséklet-emelkedését szemlélteni.

A hőmérsékletet a réteg közepében mérték. A 3 m magas réteg hőmérséklet-növekedése 23 °C, az 1,5 m vastagé 16 °C és a 0,75 m vastagé csak 9 °C. A 0,75 m magas réteg már nem hűl le, ha 2 nap múlva betonozzák rá a következő réteget. Ez az 5.55. ábrából tűnik ki. A 3 m vastag épületrészt a bal oldalon egy rétegben betonozták, a jobb oldalon 4 rétegben és a 75 cm magas rétegek betonozása között 2 nap szünetet tartottak. A 3 m vastag réteg 4 nap alatt érte el a maximális 23 °C hőmérséklet-növekedését. 2 nap múlva az első 75 cm-es réteg hőmérséklete 9 °C-kal növekedett, 4 napos korban a második réteg 12 °C-ot és 8 nap múlva a negyedik réteg 13 °C-ot melegedett fel.

Ha a repedéskorlátozást vízszintes szakaszolással szándékoznak elérni, akkor egymás után betonozott rétegek közötti átlagos hőmérséklet-különbség szintén átmenő repedés forrása lehet. Az 5.55. ábra szerint az alaptestre betonozott első réteg hőmérséklete – +25 °C frissbeton-hőmérséklet esetén – lényegesen függ a rétegvastagságtól. De nemcsak a hőmérséklet-növekedés nagysága függ, hanem a maximális hőmérséklet időpontja is, tehát a hőmérséklet-csökkenés időpontja is. 0,5 m vastag rétegeket naponta szabad egymásra betonozni. 1 m-es rétegek esetén két réteg betonozása között a 3 napos szünetet indokoltnak tartjuk.

A repedésveszélyt ez esetben is az 5.53. ábra szerint kell megítélni. Ha az egyes rétegek közötti hőmérséklet-különbség (és az leginkább az alaptest és az első réteg között léphet fel) miatt a repedésveszély fennáll, akkor az alaptest melegítésével, ill. a frissbeton hőmérsékletének a csökkentése által kell csökkenteni a hőmérséklet-különbséget.

A megrepedést nem gátolja meg, de a repedésszélességet korlátozza a betonrétegben a fal tengelye irányában elhelyezett, lehetőleg kis átmérőjű, periodikus profilú acélbetétekből készített vasalás, célszerűen hálóvasalás. Ezt a vasalást a rétegvastagság mentén kell elosztani. Ez a vasalás csak akkor hatásos, ha a mennyisége a betonkeresztmetszetre vonatkoztatott 0,5%-ot eléri.



5.55. ábra. A hőmérséklet befolyása egy rétegben betonozás vagy rétegenkénti betonozás esetén

Ebben az időpontban a teljes rétegsor hőmérséklete egyenletesen 11–13 °C-kal növekedett. A rétegenkénti betonozás így módon a réteg közepének a hőmérsékletét mintegy 10 °C-kal csökkentette, ez azonban tekintélyes időt vett igénybe.

Rawhouser szerint a műszakilag legelőnyösebb betonozási sebesség naponként 15–30 cm lenne, 50 cm/nap-nál több semmiképp sem legyen.

A várható legnagyobb hőmérséklet-különbség megállapítható a beton adiabatikus kaloriméterben mért hőmérséklet-emelkedéséből a beépített rétegvastagság függvényében az 5.52. ábra alapján (*Vinkeloe és Basalla*). Ez azonban csak nagy létesítményeknél igaz, ott is úgy, hogy a görbéből kivett érték 0,8-szeresét, mint átlaghőmérsékletet vesszük figyelembe. Ezek 300 kg/m³, különböző minőségű cementtartalommal készült betonokra vonatkoznak. Közepes létesítmények építése esetén ezek közvetlenül nem használhatók.

6. Nagy szilárdságú cementek (550 pc) felhasználásában rejlő lehetőségek

[Balázs–Kolostori–Székely (1989), Balázs (1969, 1985)]

6.1. Bevezetés

Az első energiaválság óta egyre élesebben vetődik fel az energiatakarékosság kérdése. Az anyag- és energiatakarékosságot kormányprogram írta elő. Vállalataink keresték azokat a megoldásokat, amelyek a vállalati érdekekkel összeegyeztethető módon anyag- és energiatakarékossághoz vezettek.

Hazánkban a 80-as évek közepén évente kb. 10 millió m³ betont állítottunk elő. Ebből kb. 2,5 millió m³ az üzemben előre gyártott beton volt, amelynek döntő többségét gőzöléssel szilárdították. Magában a Beton- és Vasbetonipari Művekben 1984-ben 350 pc egyenértékben 424 kt cementet használtak fel. 690 000 m³ gőzölt betont állítottak elő. Az átlagos cementfelhasználás kb. 400 kg/m³ volt. Közismert, hogy a beton legenergiaigényesebb része a cement, ennek ellenére ebben a közleményben kifejezetten a cementmegtakarítás kérdéseivel nem foglalkozunk. Szólni kell ugyanakkor a cementgyártás energetikai kérdéseiről is röviden.

Egyértelműnek kell elfogadni azt a tényt, hogy a betonok szilárdsági és szilárdulási jellemzői – az egyéb tényezők változatlanságát feltételezve – elsődlegesen a készítésükhöz felhasznált cementektől és azok fajlagos mennyiségétől függenek. Másrészről nem hagyható figyelmen kívül, hogy a betonok optimális péptelítettségének biztosítása érdekében kívánatos az előírt betonszilárdsággal összhangban levő szilárdságú cementfajta alkalmazása. Nagy szilárdságú cementekkel kisebb szilárdságú betonok is előállíthatók ugyan, de ezek péptelítetlenek, és így betontechnológiai vonatkozásban kedvezőtlen tulajdonságúak lesznek. Ebből következik az is, hogy a nagy szilárdságú cementek használata elsődlegesen a különleges szilárdsági követelményeket kielégítő betonoknál indokolt.

A nagy szilárdságú cementek felépítéséből, kémiai összetételéből és granulometriai jellemzőiből adódóan számos olyan tulajdonságuk van, melyek kedvezően használhatók a betontechnológiákban. Továbbiakban elsődlegesen ezen tulajdonságokkal, és kihasználási lehetőségeikkel foglalkozunk. Ki kell emelni a nagy szilárdságú cementek azon tulajdonságát, hogy hidratációjuk (kötés és szilárdulás) során jelentős mennyiségű hőt fejlesztenek, ami megfelelő feltételek megteremtése esetén a betonok szilárdításánál hasznosítható. Ez a megfontolás magában hordja a betonszilárdítás során lehetséges hőenergia-megtakarítás egyik módozatát is.

Természetesen számolni kell azzal is, hogy a cementgyártás rendkívül hőigényes eljárás, ahol az energiafelhasználás valamilyen függvénye az előírt szilárdsági tulaj-

donságoknak. Ezért mielőtt bemutatnánk a nagy szilárdságú cementek (pl. 550 pc, mostani szilárdsági jele 52,5) felhasználásával elérhető eredményeket, röviden utalni kell a különböző cementfajták gyártásának energetikai kérdéseire.

6.2. A cementgyártás energiafelhasználása

A portlandcementek gyártásának alapanyagai természetes ásványi nyersanyagok, melyekből megfelelő előkészítés (kibányászás, aprítás, törés, keverés, őrlés, homogenizálás stb.) után égetéssel állítják elő a féltermékeknek vagy közbenső terméknek tekinthető klinkert.

A klinkerek oxidos kémiai és ezzel szoros összefüggésben levő ásványi összetétele határozza meg egyrészt az azokból őrlhető cement műszaki jellemzőit, másrészt a klinkerégetéshez szükséges energia mennyiségét. E helyen a nyersanyagok előkészítésének energiaigényével nem szükséges foglalkozni, mivel ennek nagyságrendje a tervezett klinkerösszetételtől gyakorlatilag függetlennek, és egy adott gyártástechnológiai rendszernél közel állandónak tekinthető. *Meghatározó ugyanakkor a cement kívánt minősége szerinti klinker összetétele, ennek függvényében az égetés hőigénye, továbbá a cement őrlési energiaigénye.*

Az általánosan használatos jelölési módokat alkalmazva a nagy szilárdságú cementek gyártásához szükséges klinkerek kívánatos összetételét a 6.1. táblázat mutatja.

A cementgyártásban a nyersanyagok oxidos kémiai összetétele alapján számítható a klinkerek ásványi összetétele. A gyakorlatban azonban ezen számítások teljes körű részletes elvégzése nem szükséges. Egy-egy adott technológián belül megbízhatóan alkalmazhatók a cementkémiában honos különböző modulusok az összetétel beállítására.

A cementgyártás energiaigényességéhez kapcsolódóan két modulusról, a szilikát-modulusról (SM), illetve a telítési tényezőről (TT) kell említést tenni.

A *szilikát-modulus* nagyságrendje utal a kalcium-szilikátok mennyiségének arányára az egyéb klinkerásványokhoz képest. Kívánatos értéke nagy szilárdságú cementek klinkerében 2,4–2,8.

A *telítési tényező* értéke lehetővé teszi annak megítélését, hogy az előforduló alkotókból a C_3A és C_4AF képzésére lekötött CaO -on felül mennyi CaO áll rendelkezésre kalcium-szilikátok képzésére. $TT = 1$ értéknél az összes SiO_2 -mennyiség trikálcium-szilikát (C_3S) vagy alit alakjában lenne jelen a klinkerben, azonban ez a gyakorlatban nem valósítható meg. A cementre vonatkozó MSZ 4702 szabvány $TT = \text{min. } 0,85$ értéket írt elő. Ugyanakkor a nagy szilárdságú portlandcementeknél el kell érni a $TT = 0,92$ – $0,96$ értéket, és ezzel a C_3S mennyiségének 55–65%-ra növelését.

Természetesen mind az SM, mind a TT értékének növelése a klinkerégetéshez szükséges hőmennyiség növekedésével jár. Elfogadhatónak tekinthető a fajlagos hőfelhasználás növekedésének mértéke – egy adott technológiai rendszerre megállapí-

6.1. táblázat. A fő klinkerásványok jellemzői és részarányuk a nagy szilárdságú cementek klinkerében

Klinkerásvány	Jellemző tulajdonsága a cementben	A klinkerásvány optimális részaránya nagy szilárdságú cementben, tömeg%
Trikalcium-szilikát (alit) C ₃ S	Nagy kezdő- és végszilárdság	55–65
Dikalcium-szilikát (belit) βC ₂ S	Kis kezdeti, nagy utószilárdság	15–20
Trikalcium-aluminát C ₃ A	Nagy kezdeti szilárdság, de 5±m% feletti mennyisége rontja a gőzölhetőséget	5–8
Tetrakalcium-aluminát-ferrit C ₄ AF	A cementek szulfátállóságának hordozója, a szilárdsági jellemzőkre kisebb hatása van	10–15

tott értékhez viszonyítva – minden SM értéknél 40–50 kJ/kg klinker nagyságrendben, minden 0,01 TT értékre pedig 30–60 kJ/kg klinker nagyságrendben. Meg kell azonban jegyezni, hogy a TT értékének 0,95–0,96 fölé növelése során a fajlagos égetési hőszükséglet már nem lineárisan, hanem exponenciálisan emelkedik.

A cementgyártás energiaszükségletének másik meghatározó részét a cementörlés emésztí fel. A nagy szilárdságú cementek gyártása során – a szokványos tömegcementekhez viszonyítva – jelentősen növelni kell az örlési finomságot. Ez elérhető a ma használatos, korszerű szélosztályozós körfolyamatos rendszerű cementmalmokkal. Figyelembe kell azonban venni, hogy az örlési finomság növelésével, amit Blaine-szerű fajlagos felülettel lehet jellemezni, egyrészt jelentősen növekszik a malmok energiafelhasználása, másrészt meredeken esik teljesítményük. Az örlésfinomság

6.2. táblázat. Egyes hazai gyártású cementfajták közepes energiatartalma (befektetett összes gyártási energia)

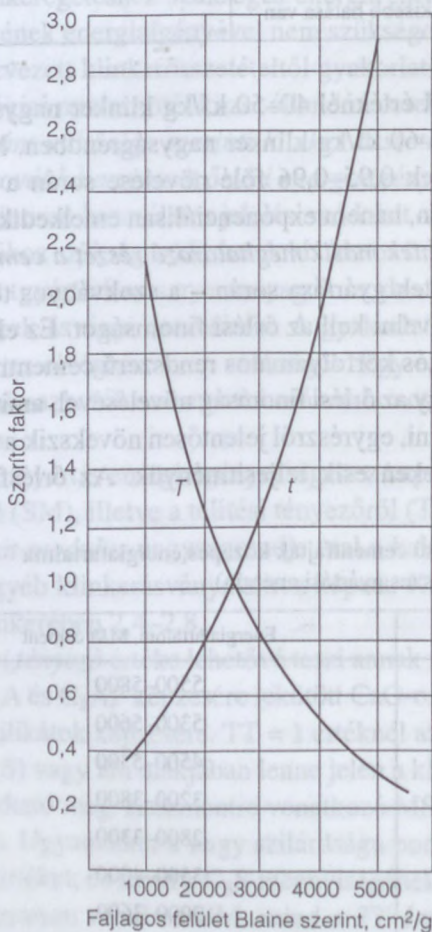
Cementfajta jele	Energiatartalom, MJ/t cement
550 pc	5500–5800
450-R pc	5300–5600
450 pc	4500–5300
350 kspc 20	3200–3800
350 kspc 40	2800–3300
350 ppc 10	3500–4000
350 ppc 20	3000–3600

Megjegyzés: A fenti adatokban a cementgyártási villamos energia 3600 kJ/kWh egyenértékkel számítva szerepel. A cementgyártás összes energiaszükségletéből a klinkerégetés hőigénye 88–92%-ot tesz ki.

– malom teljesítmény – őrlési energia felhasználás összefüggését a 6.1. ábra diagramjai jelzik hidraulikus kiegészítőanyagot nem tartalmazó, tiszta klinkercementek esetében. Granulált kohósalak adagolása a klinkerhez növeli, szénpernye adagolása kis mértékben csökkenti az őrlés energiaigényét.

A cementgyártás összes energiafelhasználását – tájékoztató jelleggel – MJ/t cement értékben kifejezve a 6.2. táblázat jelzi, mint a hazai gyártású egyes cementtípusok energiataralmát, azzal a megjegyzéssel, hogy a megadott értékek cementgyáranként jelentősen eltérhetnek.

A 6.2. táblázat adatai szerint a betonok készítéséhez felhasznált cementek érdelemes energiamentységet reprezentálnak. Ezért is egyértelmű kívánság, hogy a lehetséges mértékű takarékoság érvényesüljön a cementek felhasználása során (a betonreceptúra összeállítása), másrészt hogy törekedjünk a cementekben lekötött energia minél teljesebb körű hasznosítására.



Blaine cm ² /g	T	t
2000	1,3	0,77
2700	1,0	1,00
3000	0,81	1,23
4000	0,52	1,92
5000	0,34	2,94

T – malomteljesítmény, t/h
 t – őrlési energiaigény, kWh/t

6.1. ábra. Körfolyamatos golyósmalom teljesítménye és fajlagos őrlési energiaigénye a cement fajlagos felülete függvényében

6.3. Az előregyártás helyzete hazánkban a 80-as évek végén

Az előre gyártott betont hazánkban – szinte kivétel nélkül – gőzöléssel szilárdították. A gőzérlelés a legenergiaigényesebb szilárdítási mód.

Ebben az energiaszegény világban el kell gondolkodni azon, hogy a fejlett ipari országokban, ahol ugyanúgy előre gyártott termékekből építenek, mint nálunk, miért sokkal kisebb a gőzölt betonok aránya. Ennek egyik fő oka a termelési költségekben keresendő.

A gőzölést akkor lehet elhagyni, ha van nagy kezdőszilárdságú cement. Az ilyen cementet a már említett módokon vagy a klinker ásványi összetételének a megválasztásával, vagy a cement őrlési finomságának a növelésével lehet elérni. Vannak más lehetőségek is: pl. kis víz–cement tényezőjű, nagy tömörségű beton előállítása, vagy megfelelő kötés gyorsító adalékszerek adagolása. De ezek közül e helyen csak egy lehetőséggel, a cement őrlési finomságának a növelésével foglalkozunk. Ez látszik egyik legegyszerűbb módszernek, és az 550 pc csak őrlési finomságában különbözik a 450 R vagy a 450 jelű pc-től.

A finomórlés hatása következőképpen magyarázható:

- Hazánkban gyártott 450 pc-ek fajlagos felülete Blaine szerint 300–350 m²/kg. Ebben a cementben a 90 μm-nél nagyobb átmérőjű cementszemcse 4–5 m%-ot tesz ki. Tudjuk, hogy a cement hidratációja a cement felületén lejátszódó kémiai folyamat. Finomórléssel a cement fajlagos felületét növeljük meg, tehát a hidratáció nagyobb felületén indul meg, ezáltal meggyorsul. *A hidratáció meggyorsulása és ezáltal a kezdeti szilárdságnövekedés arányos a fajlagos felület növekedésével*, amit elsősorban az előregyártásban lehetne kihasználni. Ugyanakkor egyes esetekben a monolitikus vasbetonépítésben (pl. szabadkonzolos hidépítés, alagútzsalus építés, téli építés) is nagy előnyt jelent.
- Ismert az is, hogy a szilárdulásban csak a 20–30 μm-nél kisebb átmérőjű szemcsék vesznek részt teljes keresztmetszetükben, míg az ennél nagyobb szemcsék belseje olyan, mintha inert, a szilárdulásban részt nem vevő anyag volna. A cement finomabbra őrlésével nő a cementnek az a mennyisége, amely a szilárdulásban részt vesz, tehát *nő a cement végszilárdsága is*. Ennek a jelentősége azonban kisebb, mint a kezdőszilárdság növeléséé.
- A cement szilárdulása hőtermelő folyamat, a keletkező hő a hidratációhő. *Nagyobb őrlésfinomságú cementnek nagyobb a kezdeti hidratációhője is*. Ha a betonban keletkezett hidratációhő eltávozását megfelelő zsaluzattal késleltetjük, akkor a többlethidratációhő a beton hőmérsékletét növeli, s így – közvetve – hozzájárul a beton kezdőszilárdsága növeléséhez.

Az őrlési finomság növelésének itt felsorolt előnyeit már régóta ismerik. Hazánkban is többször felmerült a nagy fajlagos felületű cement igénye. Tudomásunk szerint a cementipar 1968-ban gyártott 700 jelű (akkori megnevezés szerint), majd 1984-ben és 1987-ben gyártott 550 pc jelű cementet. Röviden összefoglaljuk ezeket a próbálkozásokat. Majd mérlegre tesszük az 550 pc-et.

6.4. Az 1968. évi laboratóriumi kísérletek

[Energiatakarékosság... (1987)]

1968-ban a BVM megbízásából vizsgáltuk a cement őrlési finomságának a hatását a beton kezdeti szilárdságára [Balázs (1982)]. A kísérlet során gyári klinkerből a 6.3. táblázat 1–3. sorszámú cementjét állítottuk elő a SZIKKTI kísérleti üzemében. A cementek szilárdságát csak földnedves habarcsvizsgálattal jellemeztük. A cementek gipsztartalmát úgy választottuk meg, hogy az a Jirku szerinti egyensúlyi gipsztartalomnak feleljen meg.

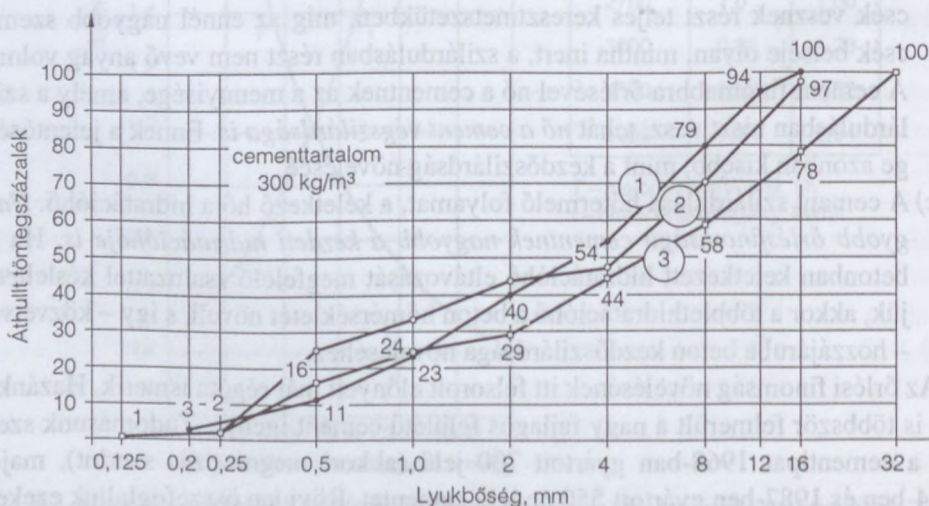
A 6.2. ábrán 1 jelű homokoskaviccsal kétféle betont készítettünk. Konzisztenciájuk gyengén képlékeny volt. Az egyik beton cementtartalma 450, a másiké 300 kg/m³, víz–cement tényezőjük 0,36, illetve 0,50 volt. A próbatestek 7,07 × 7,07 × 25 cm méretűek voltak. Azokon először 21 cm-es támaszközön – központos erővel terhelve – a hajlító-húzó-, majd a nyomószilárdságot határoztuk meg. A betonhasabókat – a tárolási problémák elkerülése végett – a vizsgálatokig vízben tároltuk.

A természetesen szilárduló betonok szilárdságát a cement fajlagos felülete függvényében 6.3. és 6.4. ábra szemlélteti. Ha feltételezzük, hogy a cement utánőrlésével a cement fajlagos felületét 330-ról 530 m²/kg-ra növeljük, akkor az

- 1 napos korú beton nyomószilárdság-növekménye 28-ról 43 MPa-ra 53,5% (450 kg/m³), ill. 14,5-ről 23 MPa-ra 58% (300 kg/m³), az
- 1 napos korú beton hajlító-húzószilárdság-növekménye 3,7-ről 4,3 MPa-ra 16,2% (450 kg/m³), ill. 2,6-ről 3,0 MPa-ra 15,3% (300 kg/m³).

Minél idősebb a beton, a %-ban kifejezett szilárdságnövekmény annál kisebb.

A kísérletből egyértelműen látható, hogy 1 napos korban 300–500 m²/kg fajlagos felülettartományban a nyomószilárdság közel arányosan nő a fajlagos felülettel,



6.2. ábra. Szemmegozslási görbék

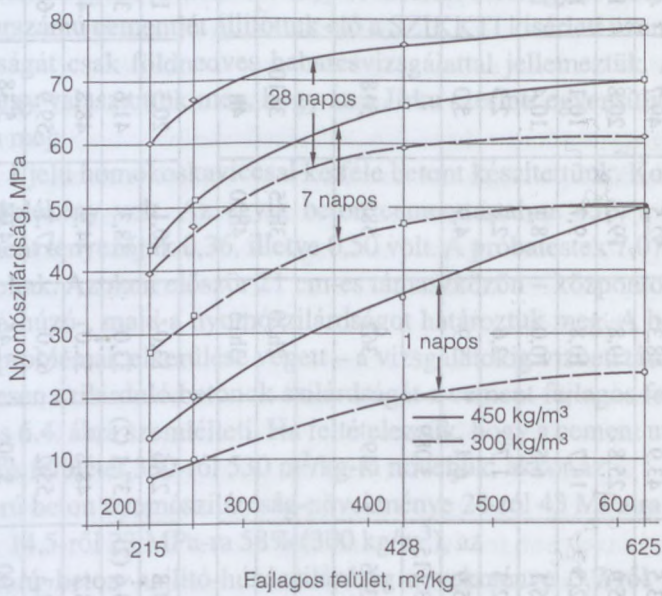
6.3. táblázat. A cementek tulajdonságai

Tulajdonság	1	2		3	4		5	6	7	8	9	10
		kísérleti cement			osztárak							
		PZ 375	PZ 475		V450R	V550					V450R	H350 kspc 20
C ₃ S, m%	48,5	47,0	45,4	43,5	43,9	49,7	52,5	48,3	49,4	49,7	49,4	
C ₂ S, m%	25,9	25,0	24,2	25,9	25,8	20,8	19,5	19,8	18,5	20,8	18,5	
C ₃ A, m%	11,7	11,3	10,9	12,5	14,7	10,1	9,7	10,8	10,6	10,1	10,6	
C ₄ AF, m%	8,4	8,1	7,8	6,1	6,5	10,4	8,1	10,0	10,2	10,4	10,2	
MgO, m%	1,0	1,0	1,0	2,3	1,7	2,3	2,8	2,6	2,6	2,3	2,6	1,9
CaSO ₄ , m%	3,8	7,0	10,1	5,9	6,4	5,0	4,9	5,9	6,3	5,0	6,3	4,8
Sűrűség, g/cm ³	3,056	2,961	2,917	3,115	3,089				3,13		3,13	3,08
Fajl. felület Blaine szerint, m ² /kg	225	428	625	396	549	518	588	362	362	518	362	410
Kötésvíz, m%	28,6	33,0	38,0						30,3		30,3	
Kötés kezdete	2h55	4h10	2h45			3h10	3h25	2h20	2h20	3h10	2h20	3h
Kötés vége	4h20	5h35	4h05			4h	4h20	3h15	3h20	4h	3h20	5h
A szilárdság, MPa, földnedves habarcon vizsgálva												
1 napos	25,4 (2)			13,8	25,6	20,1	20,1	13,0	20,1	20,5	12,0	7,5
3 napos	21,1 (2)	58,5 (2)	37,1 (2)	23,6 (2)	38,3	41,6	38,3	33,0	38,3	41,6	30,1	18,0
7 napos			48,6	38,2	44,9	48,8	44,9	51,0	44,9	48,8	43,6	26,2
28 napos	64,9	86,0	86,3	52,3	55,2	59,9	57,3	65,0	57,3	59,9	60,0	39,8
1 napos				3,00	5,30	5,38	4,04	2,45	4,04	5,38	2,6	1,74
3 napos	3,15 (2)	3,98 (2)	5,48 (2)	5,30 (2)	6,72	8,46	6,72	5,90	6,72	8,46	5,8	4,05
7 napos	2,42 (2)		7,93	7,50	7,78	8,90	7,78	7,40	7,78	8,90	7,4	5,58
28 napos	3,88	4,22	5,41	8,83	9,02	10,72	8,31	9,00	8,31	10,72	9,0	8,10

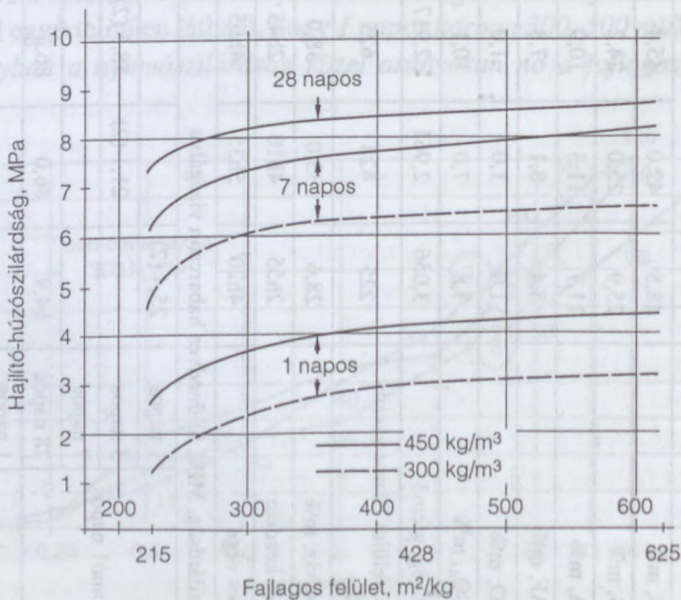
Megj.: a zárójeles szám tényleges kort jelenti

tehát az őrlési finomság növelése a kezdőszilárdság növelésének fontos eszköze (6.3. ábra). Ugyanakkor a hajlító-húzószilárdságot 350 m²/kg feletti tartományban nem lehet hatásosan növelni.

E cementekkel gőzlési kísérleteket is végeztünk, ezek eredményeit a 7.5.4. fejezetben ismertetjük.



6.3. ábra. A beton nyomószilárdsága a cement fajlagos felülete függvényében



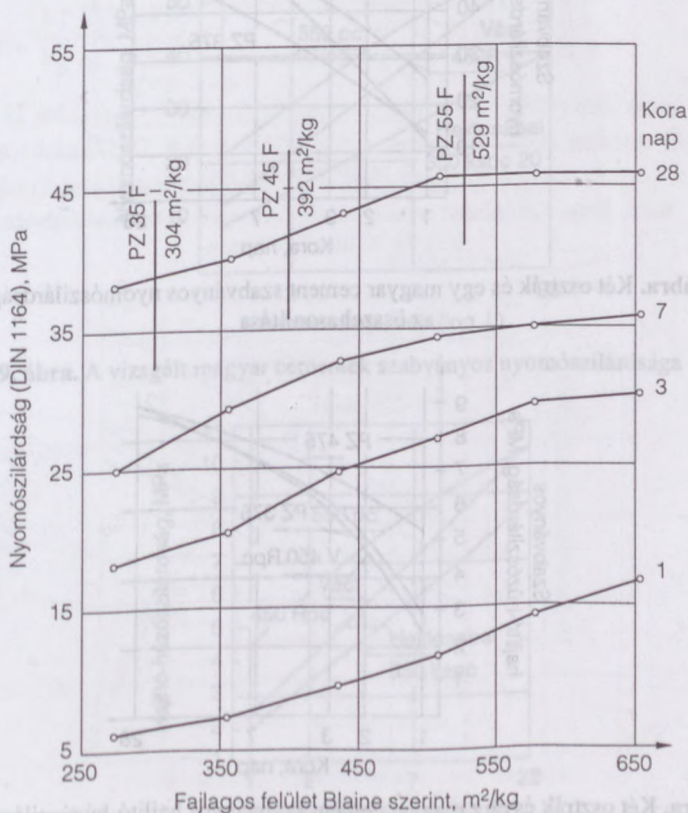
6.4. ábra. A beton hajlító-húzószilárdsága a cement fajlagos felülete függvényében

6.5. Kísérletek külföldi cementekkel

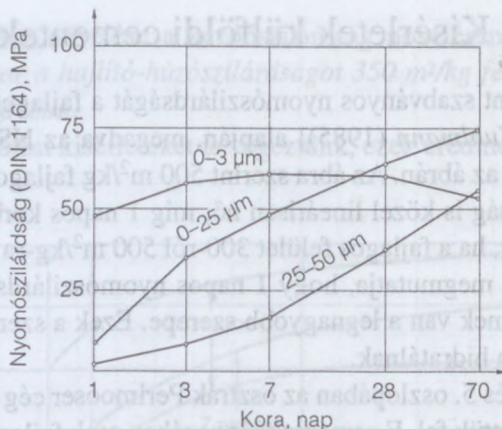
A 6.5. ábrán a cement szabványos nyomószilárdságát a fajlagos felület függvényében szemléltettük [Kuhlmann (1985)] alapján, megadva az NSZK-beli tiszta portlandcementek helyét az ábrán. Az ábra szerint 500 m²/kg fajlagos felületig még a 28 napos nyomószilárdság is közel lineárisan nő, míg 1 napos korban többszörösét éri el a nyomószilárdság, ha a fajlagos felület 300-ról 500 m²/kg-ra nő.

A 6.6. ábra azt is megmutatja, hogy 1 napos nyomószilárdság szempontjából a 0–3 μm-es szemcséknek van a legnagyobb szerepe. Ezek a szemcsék 1 napos korig gyakorlatilag teljesen hidratálódnak.

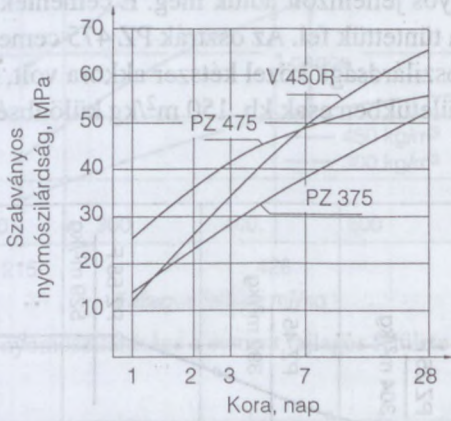
A 6.3. táblázat 4. és 5. oszlopában az osztrák Perlmooser cég által gyártott két cement jellemzőit tüntettük fel. E cementek lényegében csak fajlagos felületben különböznek egymástól [Balázs és társai (1980)]. A táblázat 6. oszlopában pedig a váci 450 R cement szabványos jellemzőit adtuk meg. E cementek szabványos szilárdságait a 6.7. és 6.8. ábrán tüntettük fel. Az osztrák PZ 475 cement 1 napos szabványos nyomó- és hajlító-húzószilárdsága közel kétszer akkora volt, mint a PZ 375 cementé. Jóllehet fajlagos felületükben csak kb. 150 m²/kg különbség volt.



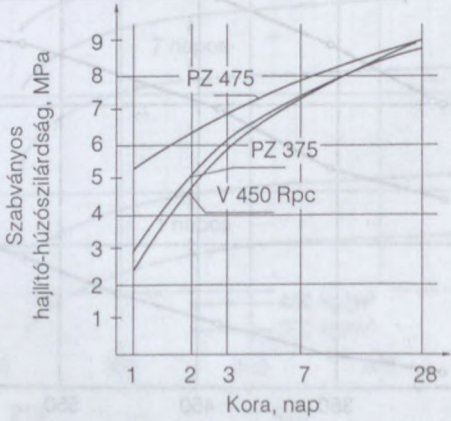
6.5. ábra. A fajlagos felülete hatása a cement szabványos nyomószilárdságára



6.6. ábra. A szemcseméret hatása a cement szabványos nyomószilárdságára



6.7. ábra. Két osztrák és egy magyar cement szabványos nyomószilárdságának az összehasonlítása



6.8. ábra. Két osztrák és egy magyar cement szabványos hajlító-húzószilárdságának az összehasonlítása

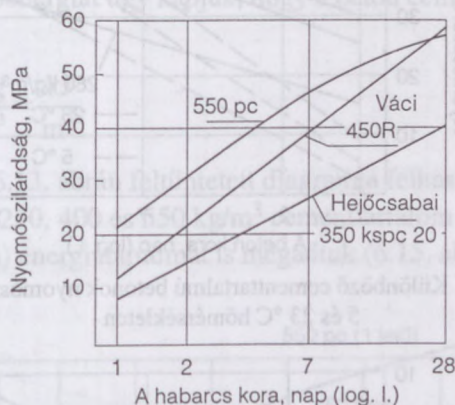
6.6. Kísérletek 550 pc-tel 1984–85-ben

6.6.1. Laboratóriumi kísérletek

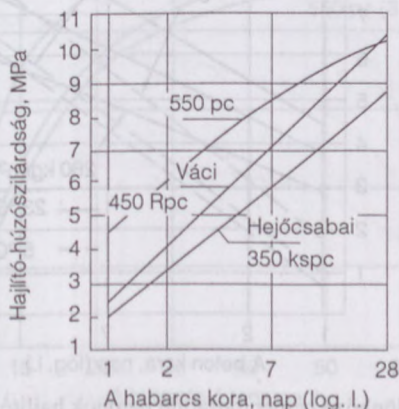
Az 1984–85 évben gyártott 550 pc-et a DCM Tatabányai Gyárában állították elő a váci 450 Rpc utánörlesztésével. Ennek a cementnek a jellemzőit a 6.3. táblázat 7. és 8. oszlopában tüntették fel. Kutatásaink során a váci 450 Rpc-tel és a hejőcsabai 350 kspc 20 cementtel hasonlítottuk össze (6.3. táblázat 9. és 10. oszlopa).

A hejőcsabai 350 kspc 20 cementtel azért, mert ezt használták nagy mennyiségben a BVM Alsózsolcai Gyárában.

E három cement szabványos szilárdságának időbeli alakulását a 6.9. és 6.10. ábrán hasonlítottuk össze. Az 550 pc-nek az 1 napos szilárdsága a váci 450 Rpc-hez viszonyítva is közel kétszerese, 28 napos szilárdságukban azonban alig van különbség. A hejőcsabai 350 kspc 20-hoz viszonyítva mind a kezdeti, mind a későbbi szilárdság (a vizsgált 28 napos korig) igen nagy, ami a kohósalak lassú szilárdulását juttatja kifejezésre.



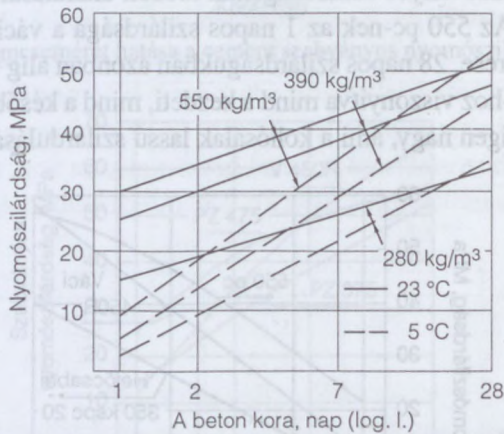
6.9. ábra. A vizsgált magyar cementek szabványos nyomószilárdsága



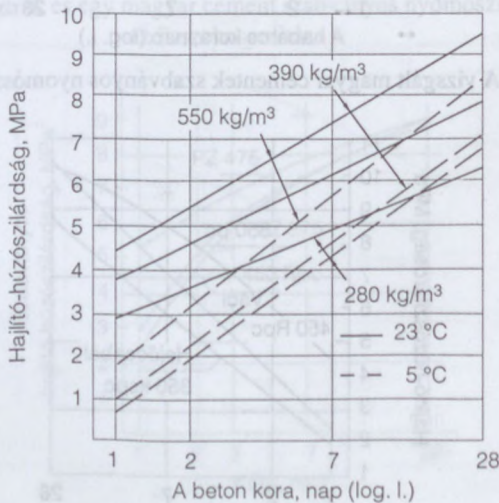
6.10. ábra. A vizsgált magyar cementek szabványos hajlító-húzószilárdsága

A 6.11. és 6.12. ábrán olyan betonok szilárdulását tüntettük fel, amelyeket a 6.3. táblázat 7 jelű cementjével készítettünk. Az adalékanyag szemmegoszlását a 6.2. ábrán 2. jelűként adtuk meg. A beton tömörödési mérőszáma 0,9. A cementtartalom 280, 390, ill. 550 kg/m³ volt. Az ábrákról látható, hogy 1 napos korban 23 °C hőmérsékleten nagy szilárdságokat kaptunk. Nevezetesen az 1 napos szilárdságnak a 28 napos szilárdsághoz viszonyított értéke következő volt:

	280	390	550
	kg/m ³ cement		
nyomószilárdság, %	45	52,5	58
hajlító-húzószilárdság, %	47	48	48



6.11. ábra. Különböző cementtartalmú betonok nyomószilárdsága 5 és 23 °C hőmérsékleten



6.12. ábra. Különböző cementtartalmú betonok hajlító-húzószilárdsága 5 és 23 °C hőmérsékleten

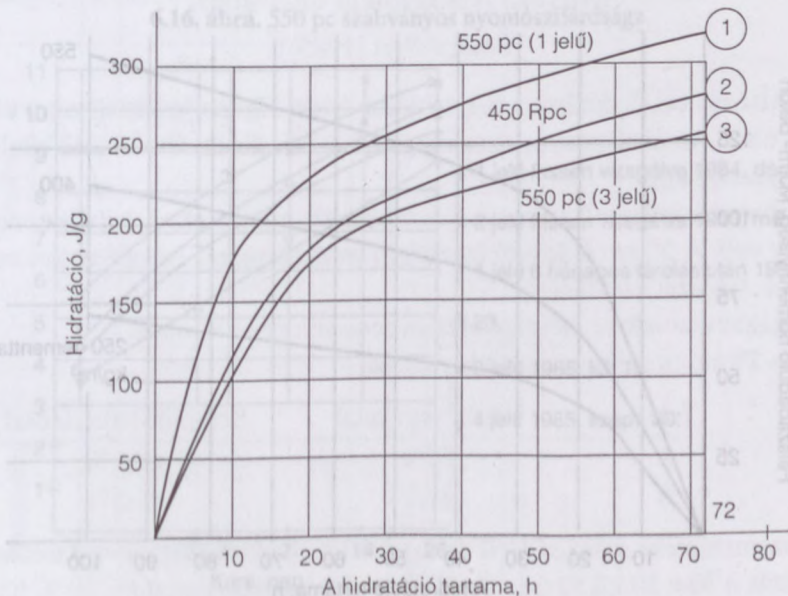
Ez a szilárdság már akkora, hogy a szilárdulási folyamatot rendszerint megzavaró gőzölést el lehet hagyni. A 6.11. ábra azt is szemlélteti, hogy péppel túltelített beton nyomószilárdsága (390 kg/m^3 -ról 550 kg/m^3 -re növelve a cementtartalmat) sokkal kevésbé nőtt, mint 280 kg/m^3 -ről 390 kg/m^3 -re növelve a cementtartalmat. Az ábra azt is szemlélteti, hogy 550 pc -tel 5°C hőmérsékleten is jelentős a beton kezdeti szilárdulása, és későbbi szilárdulása olyan mérvű, hogy 28 napos korra eléri vagy közel eléri a 23°C hőmérsékleten szilárduló beton szilárdságát. Ez a kísérlet is azt a hipotézist támasztja alá, hogy a hűvösben tárolás a hosszúrostú kalcium-szilikátok képződésének kedvez, ezek viszont nagyobb végszilárdságot eredményeznek.

6.6.2. A hidratáció hő energiátartalma

A hidratáció hő időbeni alakulása függvényében kiszámítható a felszabaduló hőmennyiség energiátartalma. Ha a hidratáció hő dimenziója kJ/kg , akkor adott időpontig felszabaduló hőenergiát úgy kapjuk, hogy a beton cementtartalmát szorozzuk a hidratáció hővel.

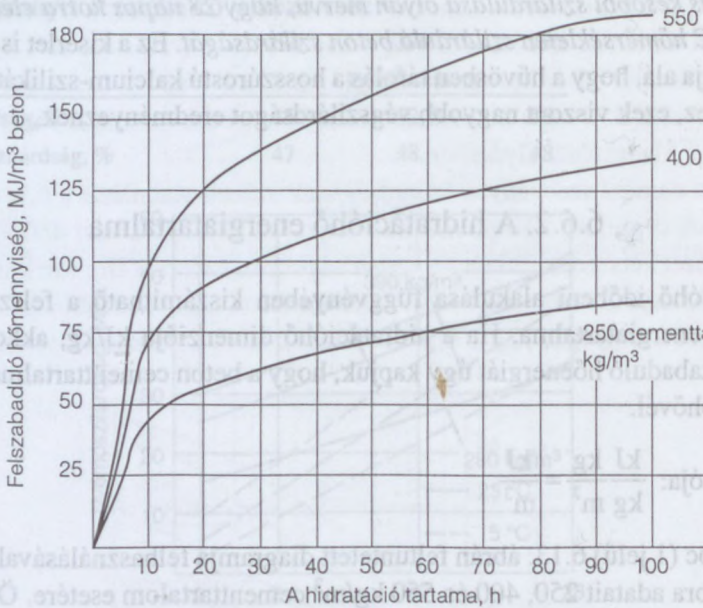
$$\text{Dimenziója: } \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}.$$

Az 550 pc (1 jelű) 6.13. ábrán feltüntetett diagramja felhasználásával számítottuk ki a 6.14. ábra adatait 250 , 400 és 550 kg/m^3 cementtartalom esetére. Összehasonlítással a 450 Rpc (2 jelű) energiátartalmát is megadtuk (6.15. ábra).

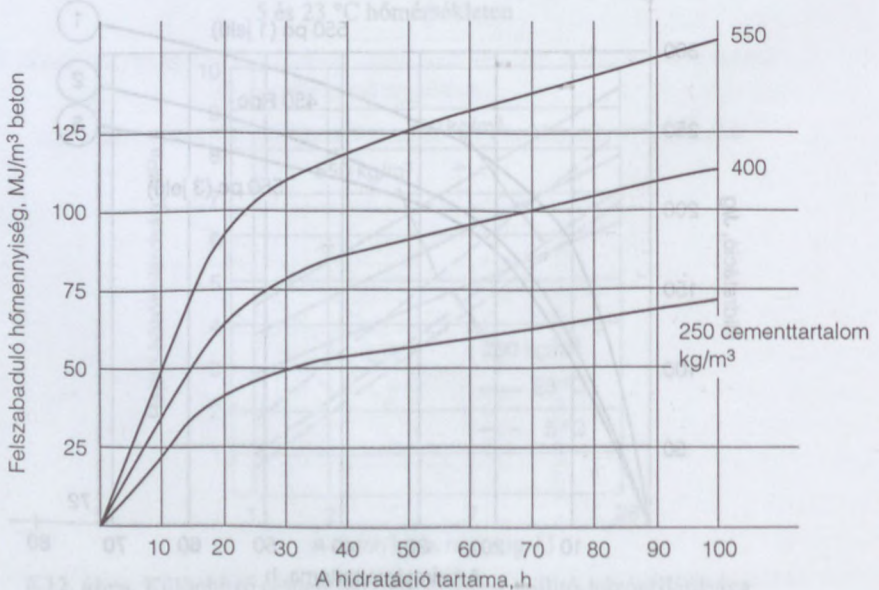


6.13. ábra. 550 pc hidratáció hője

A hidratáció hő energiátartalma tehát a cementfajta lényeges függvénye. Ez a felszabaduló energia használható fel tehát a beton hőmérsékletének növelésére, s ezáltal a beton szilárdulásának a gyorsítására. Hasonlóan fel lehetne rajzolni a kalcium-kloridban, a nagyobb indulási hőmérsékletben rejlő energiátartalmat. E hő felhasználásában rejlik a hidratáció hő szerepe az energiatakarékosságban.



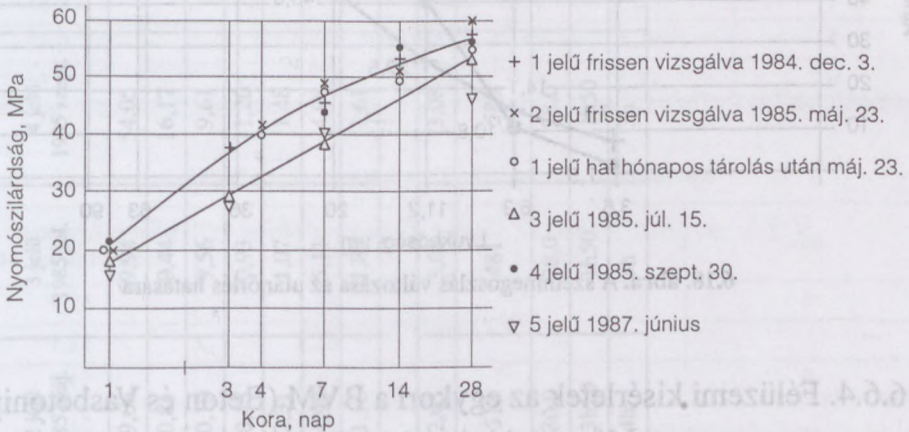
6.14. ábra. 550 pc energiátartalma (20 °C indulási hőmérséklet)



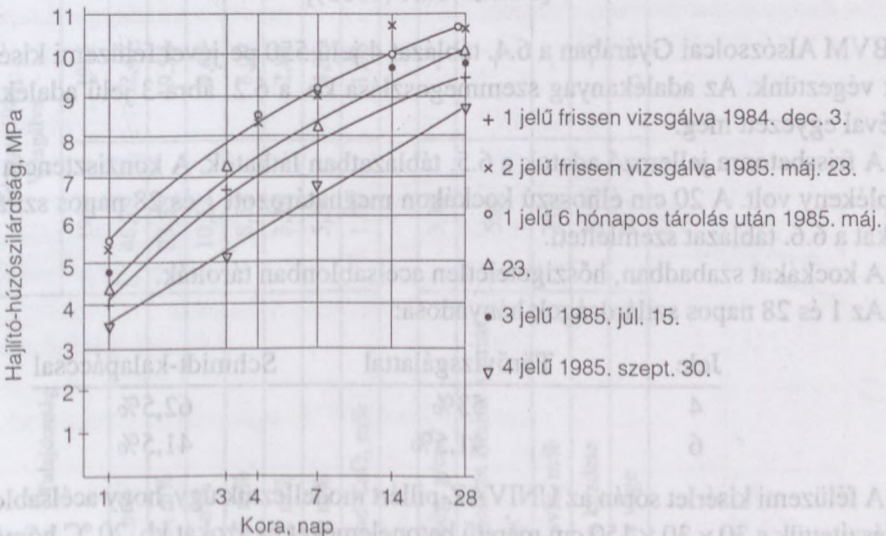
6.15. ábra. 450 pc energiátartalma (20 °C hőmérsékleten)

6.6.3. Az 550 pc öregedése

Mivel a 6.3. táblázat 1 jelű cementjével a laboratóriumi kísérletek több hónapon át tartottak, megvizsgáltuk az 550 pc öregedését is a 6.4. táblázat cementjeivel. Ha az 550 pc-et jól záró műanyagzsákban tároltuk, akkor nem romlottak szilárdsági tulajdonságai 6 hónapos tárolás alatt sem (6.16. és 6.17. ábra). Sőt a friss cement hajlító-húzószilárdsága kisebb volt, mint a 6 hónapig tárolt. Ennek valószínű oka, hogy azt télen vizsgáltuk, a másikat meg nyáron. A két cement tárolási hőmérséklete között 4–5 °C különbség volt. A vizsgálat arra enged következtetni, hogy ha a cementet kihűlt állapotban őrlik finomabbra, akkor nem következik be a finom szemcsék koagulációja (összetapadása), amire melegen finomra őrölt cementnél számítani lehet.

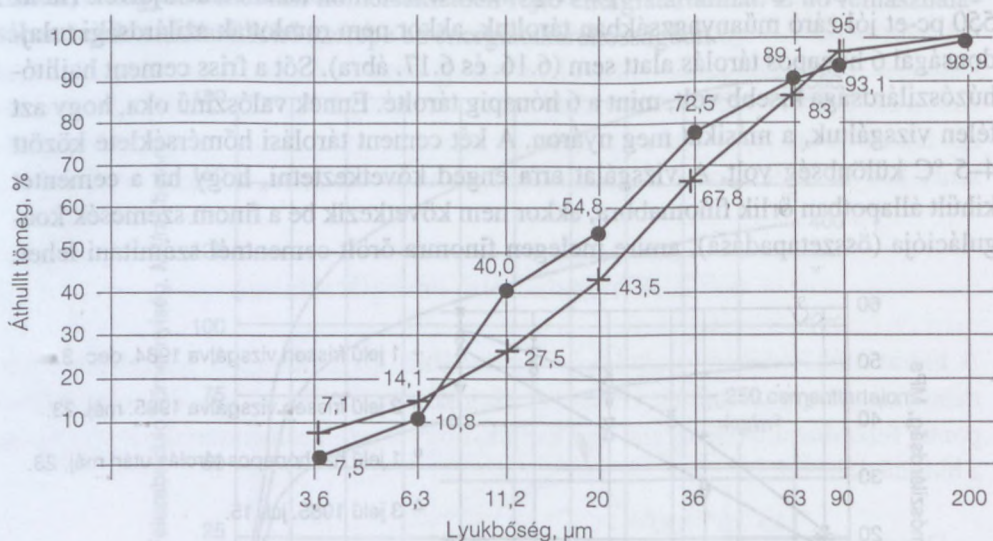


6.16. ábra. 550 pc szabványos nyomószilárdsága



6.17. ábra. 550 pc szabványos hajlító-húzószilárdsága

Az V450R cement utánőrlése hatására a 6.18. ábra szerinti szemcsefinomodás következett be. Az utánőrölt cementben elsősorban az 5–60 μm átmérőjű szemcsék mennyisége nőtt meg.



6.18. ábra. A szemmegoszlás változása az utánőrlés hatására

6.6.4. Félüzemi kísérletek az egykori a BVM (Beton és Vasbetonipari Művek) Alsózsolcai Gyárában

[Balázs–Suri (1985)]

A BVM Alsózsolcai Gyárában a 6.4. táblázat 4 jelű 550 pc-jével félüzemi kísérleteket végeztünk. Az adalékanyag szemmegoszlása kb. a 6.2. ábra 3 jelű adalékanyagáéval egyezett meg.

A frissbetonra jellemző adatok a 6.5. táblázatban láthatók. A konzisztencia kissé képlékeny volt. A 20 cm élhosszú kockákon meghatározott 1 és 28 napos szilárdságokat a 6.6. táblázat szemlélteti.

A kockákat szabadban, hőszigetetlen acélsablonban tárolták.

Az 1 és 28 napos szilárdságok hányadosa:

Jele	Törővizsgálattal	Schmidt-kalapáccsal
4	53%	62,5%
6	41,5%	41,5%

A félüzemi kísérlet során az UNIVÁZ-pillért modelleztük úgy, hogy acélsablonban elkészítettük a 30 \times 30 \times 150 cm méretű betonelemeket és azokat kb. 20 $^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten a gyártócsarnokban szilárdítottuk. A 3 és 5 jelű kísérlet során a betont (ill. a sab-

6.4. táblázat. A vizsgált 550 pe-ek tulajdonságai

Tulajdonság	Érkezett 1984, Vizsgálva		2. jelű 1985 máj.	3. jelű 1985. jul.	4. jelű 1985 szept.	5. jelű 1987 máj.	V450R 1985	H350 1985
	1984	1985						
C ₃ S, m%	46,79	52,47	49,66	59,94	54,05	50,97	49,42	
βC ₂ S, m%	23,35	19,54	20,81	10,44	16,17	20,10	18,52	
C ₃ A, m%	10,51	9,67	10,10	9,56	9,61	8,37	10,60	
C ₄ AF, m%	8,35	8,09	10,43	10,93	11,20	10,01	10,20	
MgO, m%	3,18	2,83	2,31	1,07	1,48	2,4	2,61	1,86
CaSa, m%	5,30	4,93	4,98	5,11	4,98	4,5	5,65	5,10
Szabad CaO, m%	1,00	1,08	1,16	1,89	1,61	1,05	1,35	1,98
Sűrűség, g/cm ³	3,15	-	2,03	3,08	3,08	3,10	3,13	3,06
Fajl. felület Blaine szerint m ² /kg	588	-	518	481	585	507	362	401
Kötésvíz, m%	28,0	-	30,0	28,0	28,0	27,0	27,5	28,0
Kötés kezdete	1h50	-	3h10	1h50	1h50	1h50	2h20	2h35
Kötés vége	3h	-	4h	3h	3h	3h	3h15	3h

lont) 5 cm vastag műanyaghab réteggel szigeteltük, míg a 4 és 6 jelűek szigeteletlenek voltak. A hőszigetelő réteg körülvette ugyan a sablont, de a merevítő acélok hőhidat hoztak létre.

A hőmérséklet-emelkedést a vastagság mentén, a fenéktől számított 0; 7,5; 15; 22,5 és 30 cm távolságban termoelemekkel mértük.

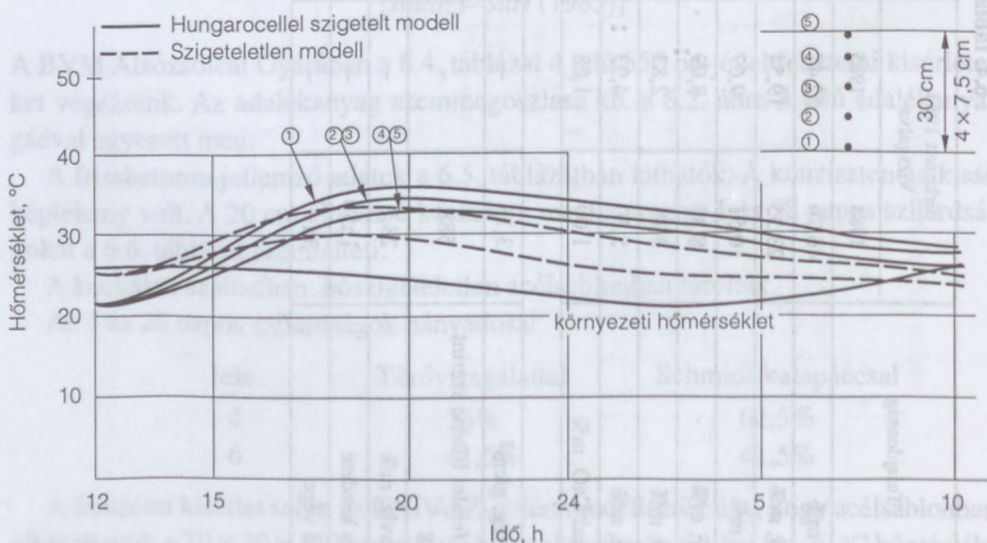
Az 5 és 6 jelű kísérlet eredményeit a 6.19. ábra szemlélteti.

6.5. táblázat. A frissbetonra jellemző adatok

Jele	Készítés napja	Cement, kg/m ³	Víz-cement tényező	Glanwille tömörödési tényező
3	VI. 4.	467	0,34	0,85
4	VI. 4.	467	0,34	0,85
5	VI. 5.	437	0,37	0,84
6	VI. 5.	437	0,37	0,84

6.6. táblázat. Az 1 és 28 napos beton kockaszilárdsága

Jele	Kora, nap	Kockaszilárdság, MPa	Schmidt-kalapáccsal mért kockaszilárdság, MPa
4	1	33,2	32,9
	28	62,8	52,4
6	1	23,8	21,5
	28	57,5	51,7



6.19. ábra. A hőmérséklet alakulása hőszigetelt és szigeteletlen sablonban

A modellek hőmérséklet-emelkedése a környezeti hőmérséklethez viszonyítva
 3 jelű kísérletnél max. 10 °C,
 4 jelű kísérletnél max. 6 °C,
 5 jelű kísérletnél max. 13 °C,
 6 jelű kísérletnél max. 9 °C.

Ez a hőmérséklet-emelkedés a hidratációhő következménye mind a szigetelt, mind a szigeteletlen betonban. Megjegyezzük azonban, hogy ez a hőszigetelés nem volt eléggé hatásos, javítani lehetett volna.

Az 1 napos szilárdságoknak a 28 napos (Schmidt-kalapácsos) kockaszilárdsághoz viszonyított értékei:

3 jelű kísérletnél 59%,
 4 jelű kísérletnél 57%,
 5 jelű kísérletnél 58%,
 6 jelű kísérletnél 54,5%.

Ez már szintén a gőzölés elhagyására ösztönző 1 napos relatív kockaszilárdság.

6.6.5. Félüzemi kísérletek a volt Szolnok megyei ÁÉV előregyártó telepén [Balázs-Suri (1985)]

Ebben az üzemben – a természetes szilárdulás ellenőrzésére – két kísérletet végeztünk. Első kísérlettel a külső falpanelt, másodikkal a válaszfalat modelleztük (vasalás nélkül). A modellek alapterülete 1 m² volt. A zsalut 48 mm vastag pallóból készítették, a hőszigetelés a zsalut, ill. a betont körülvevő 50 mm-es műanyaghab volt.

A beton tényleges összetétele a következő volt:

	3 jelű	7 jelű
Cement	550 pc	(6.4. tábl. 2 jelű)
Cementtartalom, kg/m ³	285	263
Víz-cement tényező	0,632	0,68
Adalékanyag, kg/m ³	1891	1910
Finomsági modulus	6,4	6,7
d_{max} , mm	24	24
Testsűrűség, kg/m ³	2355	2352

A beton kockaszilárdsága 20 °C hőmérsékleten

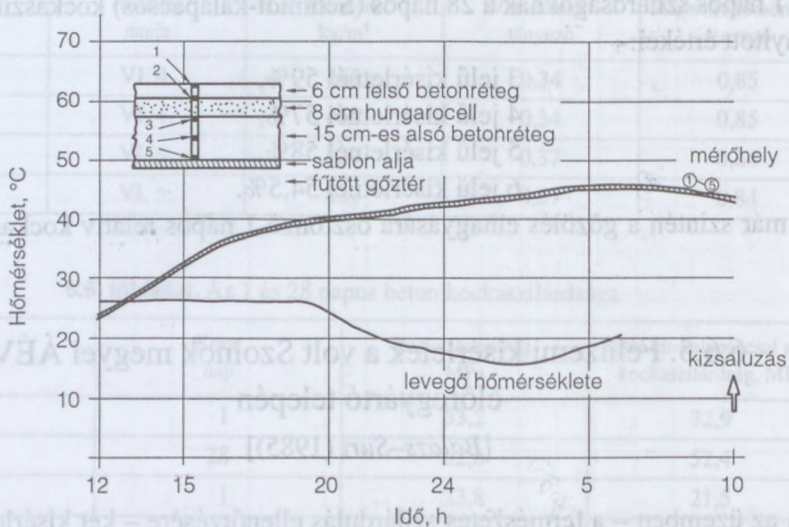
1 napos, MPa	10,4	9,8
28 napos, MPa	23,5	24,0
1 napos viszonylagos szilárdság, %	44	41,5

A modellekben a frissbeton hőmérséklete (6.20. és 6.21. ábra) 24 °C volt. Ehhez a hőmérséklethez képest a max. hőmérséklet-emelkedés

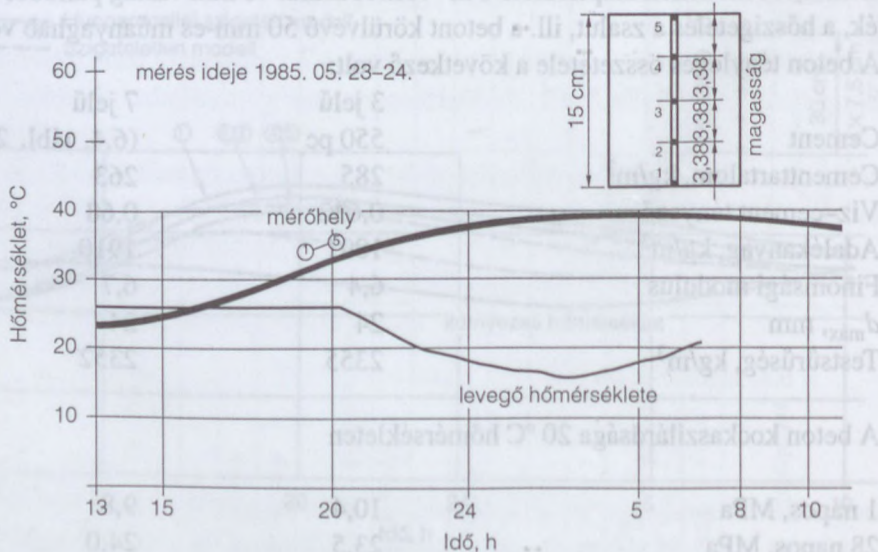
3 jelű kísérlet során 18 °C

7 jelű kísérlet során 15 °C

volt. Mindez a hidratáció következménye és úgy következett be, hogy közben éjjel a léghőmérséklet a nappali 26 °C-ról 16 °C-ra csökkent. A hőmérséklet-emelkedés miatt nőnie kellett a szilárdságnak is a kockákon megállapítottéhoz képest. A modellek betonjának az 1 napos relatív szilárdságát 55–60%-ra becsüljük.



6.20. ábra. Hőmérséklet-emelkedés a 3 jelű modellben



6.21. ábra. A hőmérséklet alakulása hőszigetelt és szigetetlen sablonban

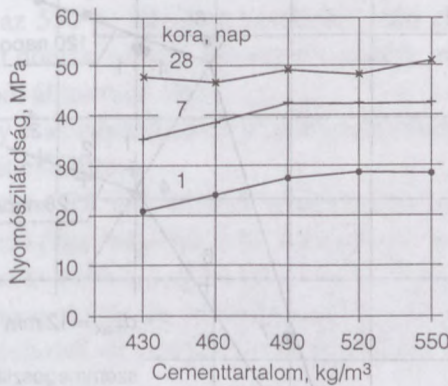
6.6.6. A nagy cementtartalom hatása a szilárdságra

A kísérlet időpontjában a BVM Alsószolcai Gyára az UNIVÁZ-elemeket a következő összetétellel készítette:

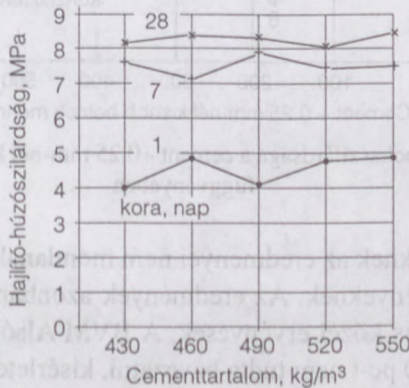
550 kg/m ³	350 kpsc 20
185 kg/m ³	víz (víz–cement tényező 0,34)
1670 kg/m ³	adalékanyag, amelyből
	48% 0/4 mm-es
	32% 4/16 mm-es és
	20% 16/24 mm-es

A beton előírt minősítési értéke 35,5 MPa (régi jele: B 450).

Ez egy erősen túltelített beton. Ezért 550 pc-tel (6.3. táblázatban 1 jelű) és a gyári adalékanyagnak megfelelő adalékanyag-szemmegoszlással megvizsgáltuk az azonos konzisztenciájú, de eltérő cementtartalmú beton természetes szilárdulását. A 6.22–6.23. ábra szerint a nyomószilárdság 1 napos korban még nőtt valamennyit a 430–490 kg/m³ cementtartalom tartományban, de 490–550 kg/m³ között nem nőtt.

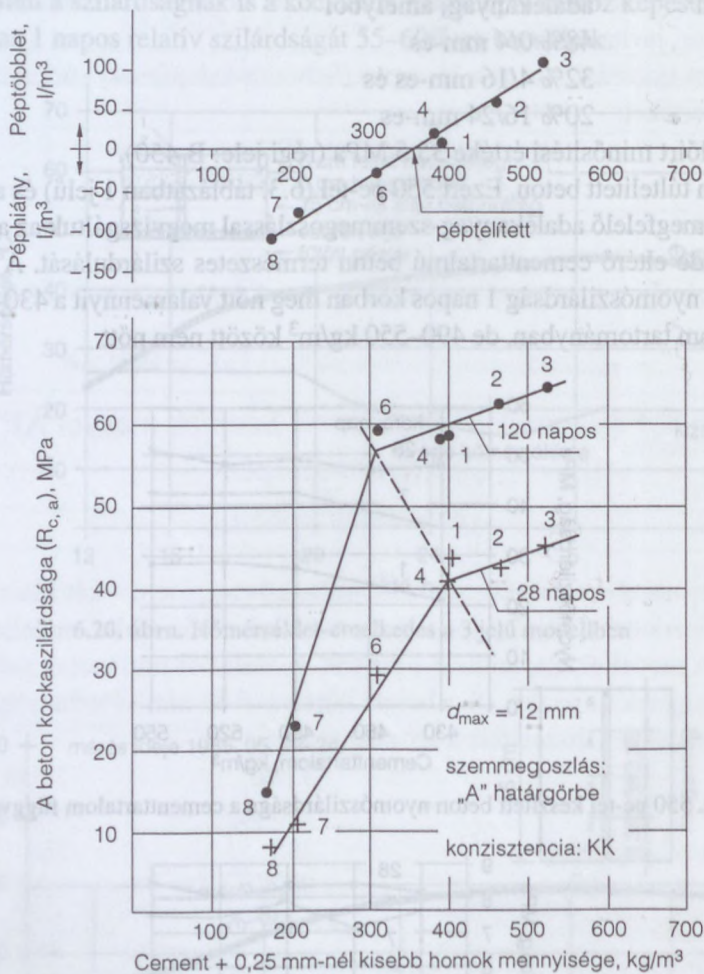


6.22. ábra. 550 pc-tel készített beton nyomószilárdsága a cementtartalom függvényében



6.23. ábra. 550 pc-tel készített beton hajlító-húzószilárdsága a cementtartalom függvényében

Arra a törvényszerűsége, hogy a péptelítettség határán túl a beton szilárdsága csak kismértékben nő, Balázs (1982)-ben részletesen rámutatott és Balázs (1987)-ben a 6.24. ábrával szemléltette. A magyarázat: növekvő cementtartalom ugyan növekvő kötőerőt jelent, de a péptelítettség határán túl nő a beton porozitása is, ami ellentétes hatású és a testsűrűség csökkenését eredményezi. Ujhelyi ezt a jelenséget szintén észlelte és betontervezési képletébe is beépítette.



6.24. ábra. A beton kockaszilárdsága a cement +0,25 mm-nél kisebb homok mennyisége függvényében

Ezeknek a kísérleteknek az eredményei nem mondanak ellent a 6.11. és 6.12. ábrán feltüntetett eredményeknek. Az eredmények azonban nemcsak 550 pc esetére, hanem más cementre is közel érvényesek. A BVM Alsószolcai Gyára bár akkor a technológiájába az 550 pc-t nem tudta bevezetni, kísérleteink alapján csökkentette a cementtartalmat.

6.7. Az 1987. évi laboratóriumi kísérletek

Tudomásunk szerint eddig csak a Békésmegyei Állami Építőipari Vállalat alapozta előregyártási rendszerét az 550 pc-re az ÉVM által kiírt Építőipar fejlesztése c. pályázat keretében. Ezt az elhatározást kedvező férlüzemi kísérletezésre alapozták.

E fejlesztéshez kapcsolódtak laboratóriumi kísérleteink [Balázs–Kolostori–Székely (1989)].

A cementet a CEMŰ Lábatlani Gyára Tatabányai Gyáregysége állította elő lábatlani klinkerből. A cement kémiai és ásványi összetételét és fizikai tulajdonságait a 6.4. táblázat 5 jelű 550 pc-je, szilárdságát a 6.16. és 6.17. ábra szemlélteti.

Az adalékanyagot osztályozott és mosott dunai eredetű adalékfrakciókból állítottuk elő.

A betonkészítés során vizsgáltuk a Viskoment V nevű folyósítószer és a Kalcidur 85 nevű szilárdulásgyorsító hatását is.

E kutatás során 15 cm élhosszú kockákat készítettünk.

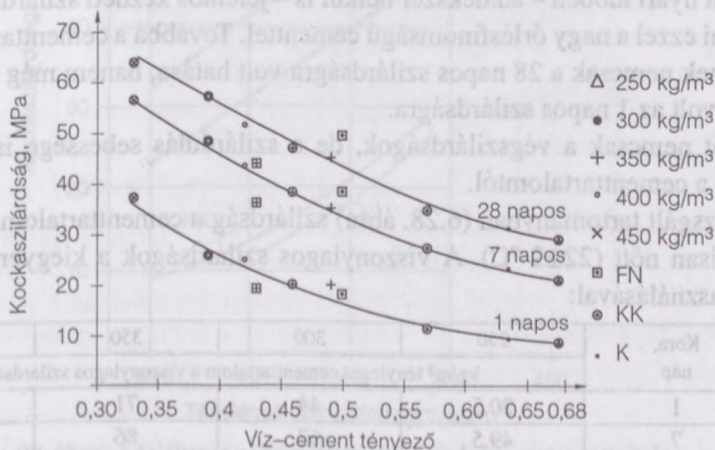
A laboratóriumi kísérletek főbb eredményei a következők:

a) Lehet, hogy belső szervezési vagy takarékosági okok készítették a CEMŰ Tatabányai Gyárát az 550 pc lábatlani klinkerből való előállítására, de ez nem volt megalapozott döntés, mert ez a cement rosszabb, mint amit 2 évvel korábban váci klinkerből állítottunk elő.

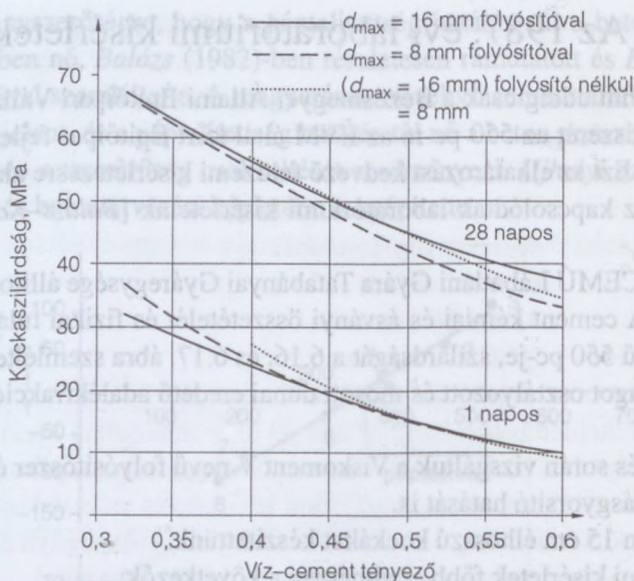
Tanulság az, hogy csak egyenletes és jó minőségű klinkerből (C_3S közel 60%) érdemes 550 pc-et előállítani.

b) $d_{\max} = 8$ mm esetén a 2% Viskoment V adalékszertartalmú beton szilárdsága a víz–cement tényező függvényében 6.25. ábra szerinti volt.

A 6.26. ábrából az is kitűnik, hogy a víz–cement tényező függvényében ábrázolva nem volt lényeges különbség a szilárdság között $d_{\max} = 8$, ill. 16 mm esetén, továbbá folyósítóval, ill. anélkül. (Hőmérséklet 22 ± 2 °C volt).



6.25. ábra. A víz–cement tényező hatása 2% Viskoment V-t tartalmazó beton szilárdságára



6.26. ábra. Folyósítóval és anélkül készített betonok szilárdságának összehasonlítása a víz-cement tényező függvényében

c) A természetesen szilárduló (22 ± 2 °C) képlékeny betonok szilárdulása a kör logaritmusa függvényében lineáris (6.27. ábra).

A szilárdságok viszonylagos értékei:

Tervezett cementtartalom kg/m ³	1	7	28
	napos szilárdság, %		
300	29,5	68,5	100,0
350	38,5	77,5	100,0
400	48,0	80,0	100,0

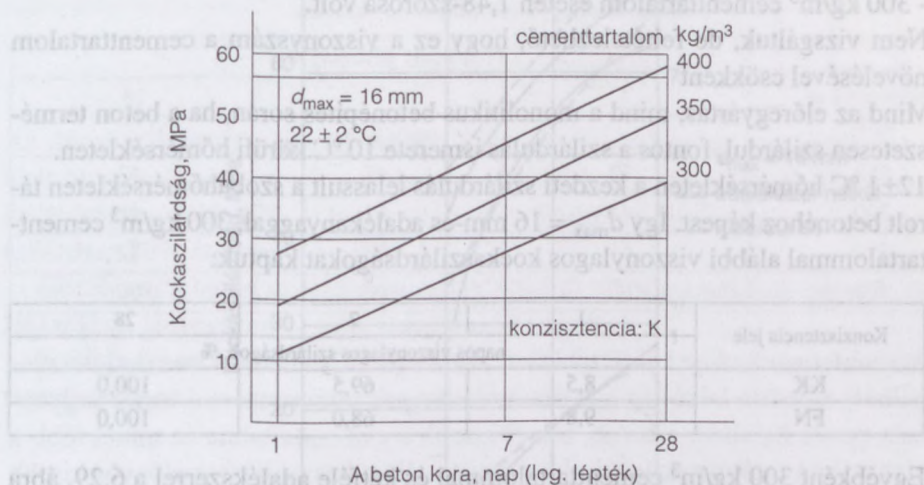
Tehát nyári időben – adalékszer nélkül is – jelentős kezdeti szilárdulást lehetett elérni ezzel a nagy őrlésfinomságú cementtel. Továbbá a cementtartalom növelésének nemcsak a 28 napos szilárdságra volt hatása, hanem még nagyobb hatása volt az 1 napos szilárdságra.

Tehát nemcsak a végszilárdságok, de a szilárdulás sebessége is lényegesen függ a cementtartalomtól.

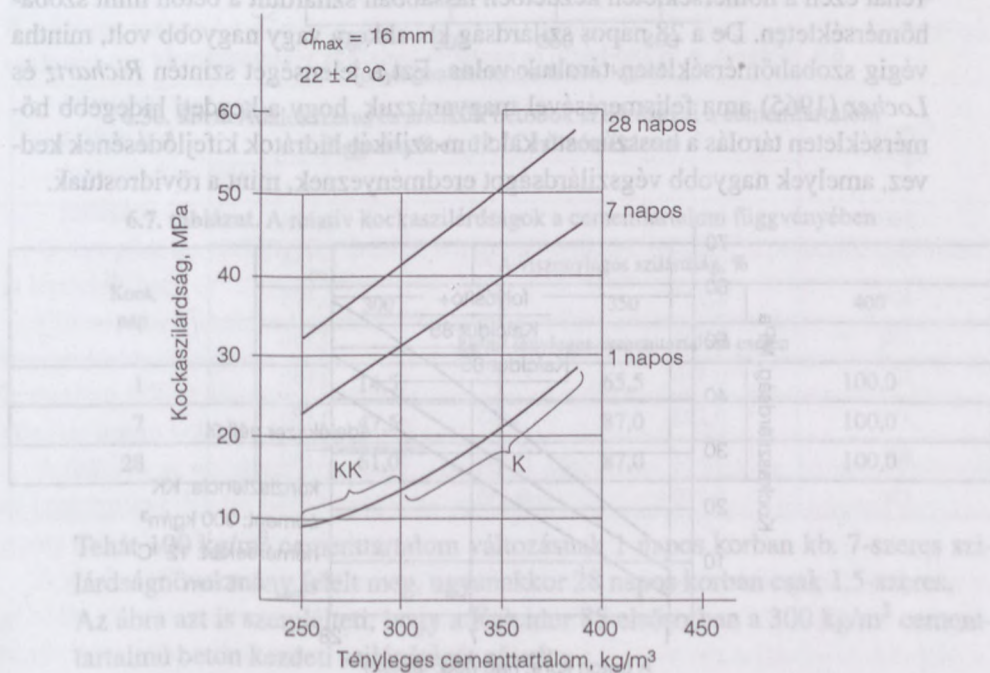
d) A vizsgált tartományban (6.28. ábra) szilárdság a cementtartalommal közel lineárisan nőtt (22 ± 2 °C). A viszonylagos szilárdságok a kiegyenlítő vonalak felhasználásával:

Kora, nap	250	300	350	400
	kg/m ³ tényleges cementtartalom a viszonylagos szilárdság, %			
1	30,5	44	71	100
7	49,5	67	86	100
28	55,5	71	87	100

A táblázatból látható, hogy amíg a cementtartalom 250 kg/m^3 -ről 400 kg/m^3 nőtt, addig a folyósító nélküli beton szilárdsága 1 napos korban 3,3-szorosára, 28 napos korban 1,8-szorosára nőtt. Tehát ebben a tartományban a cementtartalommal lényegesen lehet befolyásolni a beton korai szilárdságát. A 28 napos korú beton szilárdságát már csak kb. fele olyan mértékben növelhetjük.



6.27. ábra. Adalékszer nélküli betonok szilárdulása



6.28. ábra. Adalékszer nélküli betonok szilárdsága a cementtartalom függvényében

e) Ha az adalékszer nélküli, gyengén képlékeny konzisztenciájú betont 16 óráig nem 22 ± 2 °C, hanem 40 °C hőmérsékleten tároltuk, akkor a 40 °C hőmérsékleten tárolt betonok 16 órási kockaszilárdsága a 22 ± 2 °C hőmérsékleten tárolt 24 órási betonokénak

- 250 kg/m³ cementtartalom esetén 1,67-szerese,
- 300 kg/m³ cementtartalom esetén 1,48-szorosa volt.

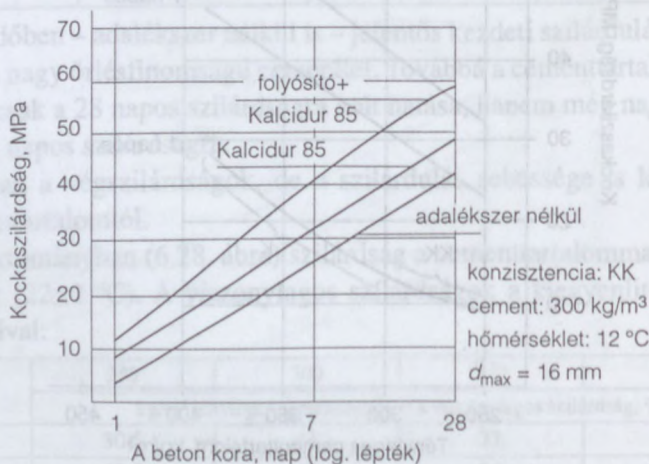
Nem vizsgáltuk, de feltételezhető, hogy ez a viszonyszám a cementtartalom növelésével csökkent

- f) Mind az előregyártás, mind a monolitikus betonépítés során, ha a beton természetesen szilárdul, fontos a szilárdulás ismerete 10 °C körüli hőmérsékleten. 12 ± 1 °C hőmérsékleten a kezdeti szilárdulás lelassult a szobahőmérsékleten tárolt betonéhoz képest. Így $d_{\max} = 16$ mm-es adalékanyaggal, 300 kg/m³ cementtartalommal alábbi viszonylagos kockaszilárdságokat kaptuk:

Kopizisztencia jele	1	7	28
	napos viszonylagos szilárdságok, %		
KK	8,5	69,5	100,0
FN	9,8	68,0	100,0

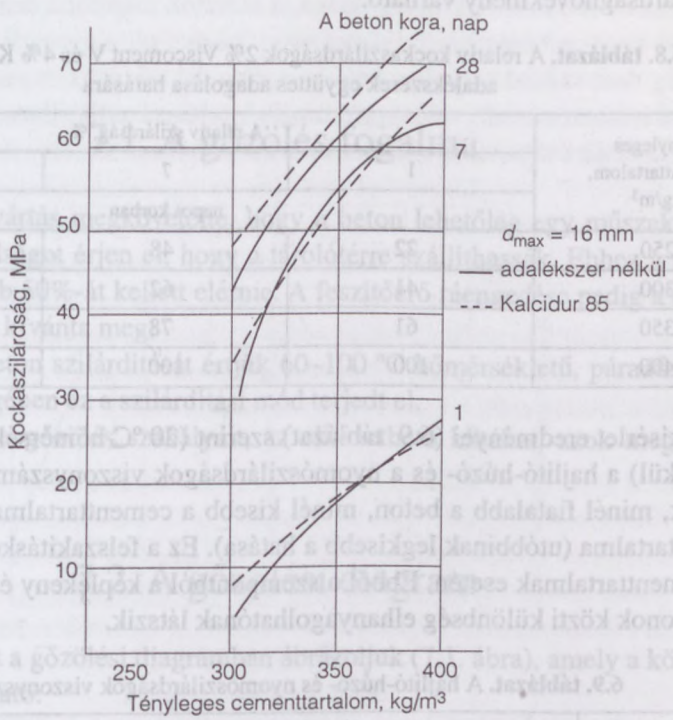
Egyébként 300 kg/m³ cementtartalommal és kétféle adalékszerrel a 6.29. ábra szerinti szilárdulást kaptuk.

Tehát ezen a hőmérsékleten kezdetben lassabban szilárdult a beton mint szobahőmérsékleten. De a 28 napos szilárdság kb. akkora vagy nagyobb volt, mintha végig szobahőmérsékleten tároltuk volna. Ezt a jelenséget szintén *Richartz* és *Locher* (1965) ama felismerésével magyarázzuk, hogy a kezdeti hidegebb hőmérsékleten tárolás a hosszúrostú kalcium-szilikát-hidrátok kifejlődésének kedvez, amelyek nagyobb végszilárdságot eredményeznek, mint a rövidrostúak.



6.29. ábra. A betonok szilárdulási folyamatának összehasonlítása 12 °C hőmérsékleten adalékszerekkel és anélkül

A 6.30. ábrán a szilárdságot a cementtartalom függvényében ábrázoltuk. A kiegyenlítő vonalak felhasználásával számított relatív szilárdságok adalékszer nélküli betonok esetére a 6.7. táblázat szerintiek.



6.30. ábra. Adalékszeres és anélküli betonok szilárdságai a cementtartalom függvényében 12 °C hőmérsékleten

6.7. táblázat. A relatív kockaszilárdságok a cementtartalom függvényében

Kora, nap	A viszonylagos szilárdság, %		
	300	350	400
	kg/m ³ tényleges cementtartalom esetén		
1	14,5	65,5	100,0
7	47,5	87,0	100,0
28	61,0	87,0	100,0

Tehát 100 kg/m³ cementtartalom változásnak 1 napos korban kb. 7-szeres szilárdságnövekmény felelt meg, ugyanakkor 28 napos korban csak 1,5-szeres.

Az ábra azt is szemlélteti, hogy a Kalcidur 85 elsősorban a 300 kg/m³ cementtartalmú beton kezdeti szilárdságát növelte.

A 2% Viskoment V és 4% Kalcidur 85 együttes adagolásakor a 6.8. táblázat szerinti viszonylagos szilárdságokat kaptuk.

Míg a cementtartalom 1,6-szorosára nőtt, addig az 1 napos szilárdság 4,55-szörösére, 7 napos korban 2,1-szeresére, 28 napos korban 1,9-szeresére nőtt. Tehát még 28 napos korban is legalább a cementtartalom növekményével arányos szilárdságnövekmény várható.

6.8. táblázat. A relatív kockaszilárdságok 2% Viscoment V és 4% Kalcidur 85 adalékszerek együttes adagolása hatására

Tényleges cementtartalom, kg/m ³	A relatív szilárdság, %		
	1	7	28
	napos korban		
250	22	48	53
300	41	62	68
350	61	78	82
400	100	100	100

g) A kísérlet eredményei (6.9. táblázat) szerint (20 °C hőmérsékleten, adalékszer nélkül) a hajlító-húzó- és a nyomószilárdságok viszonzyszámai annál nagyobbak, minél fiatalabb a beton, minél kisebb a cementtartalma és minél több a víztartalma (utóbbinak legkisebb a hatása). Ez a felszakításkor előnyös kisebb cementtartalmak esetén. Ebből a szempontból a képlékeny és kissé képlékeny betonok közti különbség elhanyagolhatóan látszik.

6.9. táblázat. A hajlító-húzó- és nyomószilárdságok viszonzyszámai

Cement, kg/m ³	A viszonzyszám			Konzisztencia
	1	7	28	
	napos korban			
300	0,320	0,220	0,175	K
350	0,230	0,220	0,135	
400	0,205	0,215	0,175	
450	0,205	0,190	0,150	
300	0,310	0,200	0,150	KK
350	0,235	0,165	0,140	
400	0,195	0,185	0,160	
450	0,210	0,155	0,160	

7. A beton gőzölése

[Balázs (1987)]

7.1. A gőzölés fogalma

Az üzemi előregyártás megkövetelte, hogy a beton lehetőleg egy műszak tartama alatt olyan szilárdságot érjen el, hogy a tárolóterre szállíthassák. Ehhez a tervezett szilárdság legalább 50%-át kellett elérnie. A feszítőerő ráengedése pedig a tervezett szilárdság 70%-át kívánta meg.

Gőzölésen a beton szilárdítását értjük 60–100 °C hőmérsékletű, páradús térben. Hazánkban lényegében ez a szilárdítási mód terjedt el.

Továbbiakban a gőzölés szabályait, az elkövethető hibákat, azok megelőzését foglaljuk össze.

7.2. A gőzölési diagram

A gőzölés menetét a gőzölési diagramban ábrázoljuk (7.1. ábra), amely a következő szakaszokra bontható:

- pihentetés,
- felfűtés,
- izotermikus érlelés,
- lehűtés.

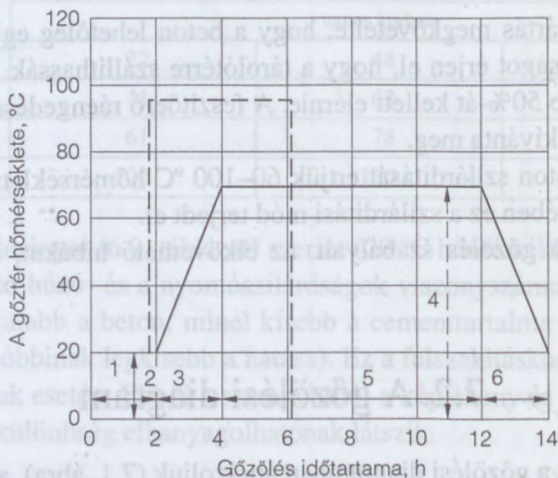
Gyors gőzölés esetén a felfűtési és a lehűtési szakasz elmarad, a pihentetési szakasz is lerövidülhet.

Pihentetésen általában sablonba bedolgozott beton tárolását értjük a gyártótér hőmérsékletén. A pihentetés lehetővé teszi, hogy a keverővíz egy része fizikailag és kémiaiilag kötött állapotba kerüljön, a beton megdermedjen és jobban ellenálljon a gőzölés során keletkező fizikai erőknél.

A *felfűtés* az az időtartam, amíg a betont a gőztérben a tárolótér hőmérsékletéről az izotermikus érlelés hőmérsékletére melegítjük. A felfűtés során indul meg a beton gyors felmelegedése kívülről befelé.

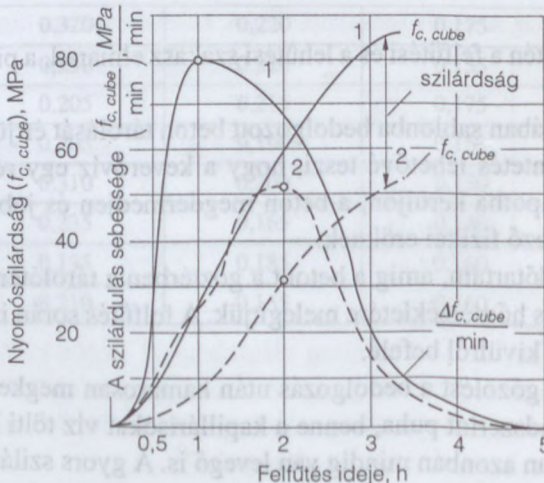
A gyakorlatban a gőzölést a bedolgozás után hamarosan megkezdjük. A beton a gőzölés kezdetén rendszerint puha, benne a kapillárisokat víz tölti ki, ha a beton jól tömörített. A betonban azonban mindig van levegő is. A gyors szilárdulás mindjárt a felfűtés elején megkezdődik. A szilárdulás sebessége a gőzölés kezdetétől számított 1–4 óra múlva maximumot ér el (7.2. ábra). A maximum helye leginkább a gőzölés

hőmérsékletétől függ (a bemutatott ábra gyors gőzölés szilárdulási viszonyait szemlélteti nagy kezdőszilárdságú cementtel készített, nagy tömörségű betonban). A betonban kialakuló hőmérsékleti viszonyoktól lényegesen függ a cementkő struktúrája, azaz a hidráttermékek kristályossága, a hidrátok mérete, a cementkő porozitása. Valójában nagyon bonyolult folyamat megy végbe, pl. a gyors felfűtés következtében a még nem szilárd betonban levő levegő és víz kitágul és a szabad (zsaluzatlan) felszín közelében a beton valósággal megkel, feltáskásodik. Ilyen állapotban szilárdul meg és szilárdsága kisebb lesz, mint a beton belsejében.



7.1. ábra. A gőzölési diagram

- 1 – a pihentetés hőmérséklete; 2 – a pihentetés időtartama; 3 – a felfűtés időtartama;
 4 – izotermikus érlelés hőmérséklete; 5 – izotermikus érlelés időtartama; 6 – lehűtési időtartama
 (a szaggatott vonal a gyors gőzölést, a folytonos vonal a szabályos gőzölést jelöli)



7.2. ábra. A gőzölési hőmérséklet és az időtartam hatása a szilárdulás sebességére
 [Malinowsky (1963)]

Az izotermikus érlelés (gőzölés) tartama alatt a gőztér hőmérséklete általában állandó. A gőzölési hőmérséklet elsősorban a felhasznált cement fajtájától függ. Minél nagyobb a cement C_3S -tartalma, őrlési finomsága, annál kisebb az optimális gőzölési hőmérséklet, amelyen a gőzölés után és az utószilárdulás során elért szilárdság a legkedvezőbb. Az izotermikus érlelés tartama elsősorban attól függ, hogy a tervezett szilárdság hány százalékát kívánjuk elérni a gőzölés befejeztével.

A lehűtés rendszerint már azzal kezdetét veszi, hogy a gőzbevezetést megszüntetjük. Akkor lesz intenzív, amikor a sablont kivesszük a gőztérből, kiszereljük az elemet, és azt a gyártócsarnokba vagy a tárolóterre helyezzük.

A lehűtés szakasza alatt megfigyelhető, hogy a betonból nagy mennyiségű gőz távozik el. Ugyanis a beton belseje nagyobb hőmérsékletű, mint a külseje, tehát diffúzió révén a beton felületéhez közel levő összes szabad víz eltávozik. A víz eltávozása olyan mérvű lehet, hogy a betonban a további szilárduláshoz szükséges víz sem marad meg. Éppen ezért szükség van a *beton utókezelésére*, amelyik minden esetben nedvesítést jelent a beton lehűtött állapotában, és ennek feladata pótolni a lehűtés során elvesztett vizet.

Továbbiakban többször hivatkozom az 1964. évi moszkvai RILEM konferenciára, amelyen megfogalmazták a gőzölés alapelveit is [pl. Butt és társai (1964)].

A gőzöléshez két fontos fogalom tartozik. Egyik az *órafokszám*, amelyen a gőzölési diagram alatti terület mérőszámát értjük. A másik a *gőzölés határfoka*, amely a gőzölt beton 1 napos és a természetesen szilárduló beton 28 napos szilárdságának a hányadosa.

7.3. A struktúraromlás kémiai okai

[Balázs–Kunszt (1965)]

A nagy hőmérsékletű izotermikus érlelés során a cementkő és a beton struktúrája általában rosszabb, mintha a beton természetesen szilárdult volna.

A betonstruktúra romlásának kémiai és fizikai okai lehetnek. A kémiai okok közé azokat soroljuk, amelyeknek a hatására kedvezőtlenebbül alakul a hidratáció folyamata, a kristályszerkezet, ill. olyan romboló vegyi reakciók mennek végbe, amelyek természetes szilárdulás esetén nem jelentkeznek. A fizikai tényezők közé azokat soroljuk, amelyek hatására a betonstruktúra fizikai okok miatt szenved károsodást. Míg előbbiben a cement, addig utóbbiban elsősorban a betonban levő víz, levegő és adalékanyag, valamint a betonban kialakuló hőmérséklet-különbség jelentős tényező.

A kutatók [Budnyikov és társai (1964), Glukovszkoj és társai (1964), Szizov (1953), Mironov (1964)] egyetértenek abban, hogy a cement gőzölése közben lényegében ugyanazok a kémiai reakciók mennek végbe, mint természetes szilárdulása esetén, csak a folyamat sebessége más. Mégis az az általános tapasztalat, hogyha a nagy tri-kalcium-szilikát-tartalmú portlandcementeket ($C_3S > 50$ m%) a beton elkészítése után hamarosan nagy hőmérsékleten gőzölgük, a cement későbbi szilárdsága elmarad

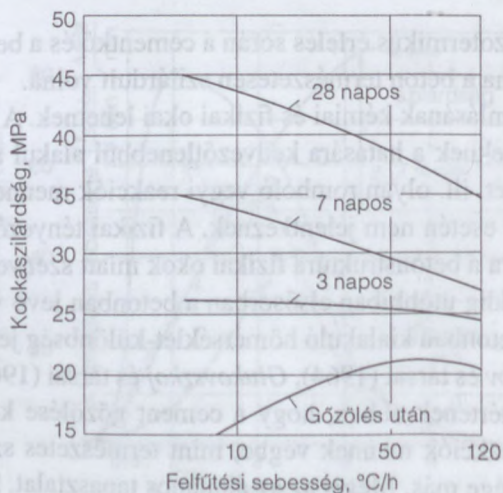
az azonos korú, természetesen szilárduló cementéhez képest. Gyors felfűtés esetén a gőzölés utáni szilárdság még jobb lehet, mint lassúbb felfűtéssel, de a gőzölés utáni szilárdulást tekintve lényegesen kedvezőbb a lassú felfűtéssel érlelt beton szilárdsága (7.3. ábra). Ezt a jelenséget azzal magyarázzák [Reinsdorf (1964), Sejkin (1957), Berkovics és társai (1964)], hogy a nagy hőmérséklet meggyorsítja a cement hidratációját, és ez nem a természetes szilárduláskor megszokott módon megy végbe, hanem a gyorsan kialakult rövid rostú kalcium-hidroszilikátok a még nem hidratálódott cementmagot vízátnemeresztő tömör szilikátréteggel vonják be, amely megakadályozza a további hidratációt. Reinsdorf (1964) szerint a hidratáció folyamata különösen akkor tér el a gőzöletlen cementétől, ha a cement trikálcium-aluminát-(C₃A)- és gipsztartalma nincs arányban, a C₃A fölös mennyiségben van jelen. Ennek oka, hogy nagy hőmérsékleten a gipsz oldhatósága csökken, míg a C₃A-é meggyorsul. Ha van elég SO₃, akkor ettringit képződik, amely a gőzölés befejeztével lényeges utószilárdulást eredményez [Jirku (1962)]. Az ettringitképződéshez szükséges SO₃ mennyisége azonban nemcsak a cement C₃A-tartalmától, hanem fajlagos felületétől is függ.

Ha tehát a szokásos, ill. megengedett szint fölé növelik az SO₃-tartalmat, akkor nemcsak hogy nem érvényesül az aluminátok (C₃A) kedvezőtlen hatása, hanem jelentősen megnő a későbbi betonszilárdság [Reinsdorf (1964)].

Mivel a túl sok gipsz gipszduzzadást okozhat, ezért a 8–10 m%-nál kisebb C₃A-tartalmú cementeket tartják jól gőzölhetőnek.

Ha nagy C₃S-tartalmú portlandcedmentet akarunk gőzölni, akkor hosszabb felfűtési időt kell választani, mint heterogén cementek esetén, és a gőzölési hőmérsékleteket is 80 °C alatt kell megválasztani.

Véleményünk szerint [Balázs (1983), Balázs–Kunszt (1965), Kunszt (1962)] a nagy C₃S-tartalmú cementek rosszabb gőzölhetőségéhez az is hozzájárul, hogy a gyors szil-



7.3. ábra. A felfűtési sebesség hatása a beton kezdeti és későbbi szilárdságára [Nersz és Jitszker (1964)]

lárduulás közben felszabaduló nagy mennyiségű kalcium-hidroxid is elősegíti a cementkő szerkezetének a romlását. Ezért nem meglepő, hogy többen [Rojak és társai (1964), Szemenov és társai (1964), Butt és társai (1964)] a heterogén portlandcementet tartják jól gőzölhetőnek. Ugyanis a klinker egy részét helyettesítő aktív kovasavtartalmú hidraulikus pótlék (pl. pernye) reakcióba lépve a hidratáció során felszabaduló kalcium-hidroxiddal, megakadályozza annak káros hatását és kalcium-hidroszilikátokat képezve növeli a szilárdságot. A klinkert helyettesítő, aktív kovasavat tartalmazó, kis mennyiségű (<20 m%) hidraulit még rendszerint nem rontja a gőzölés hatásfokát, nem nyújtja meg gőzölés időtartamát, és ennek ellenére a cement érzéketlenebb lesz a nagy hőmérsékletre, és későbbi szilárdsága megjavul. A nagy kohósalak-tartalom – jóllehet a cementkő későbbi szilárdsága nagyon kedvező, – azért nem ajánlható, mert azzal kisebb kezdeti betonszilárdságot lehet elérni, mint az azonos mennyiségű tiszta portlandcementtel vagy nagy gőzenergiatöbbletet kell befektetni.

A gőzölés utáni kisebb betonszilárdság nyilvánvalóan függ a klinker lehűtési sebességétől, a cementben levő kiégetetlen klinkermennyiségtől, a kristályszerkezetnek a természetes szilárdulás esetén megismerttől eltérő kristályosodásától, a cement szabad vastartalmától stb.

7.4. A struktúraromlás fizikai okai

7.4.1. A beton alkotóinak eltérő hőtágulási együtthatója

A beton cementből, vízből, adalékanyagból és levegőből összetett építőanyag. A frissbeton melegítésekor a beton szerkezetében bonyolult folyamatok mennek végbe, amelyek részben alkotóak, részben rongáló jellegűek. A legfontosabb rongáló folyamatok a hőmérséklet hatására a friss, porózus betonban létrejövő térfogatváltozások, valamint a hő hatására kialakult tágulás okozta belső feszültségek.

Mironov (1964), Reinsdorf (1964), Butt, Kolbasev és Timashev (1969), valamint Alexanderson szerint a felfűtési szakaszban a struktúralazulás oka, hogy a beton alkotóinak eltérő a hőtágulási együtthatója.

A hazai építő gyakorlatban használt adalékanyagok hőtágulási együtthatója $3\text{--}13 \cdot 10^{-6}/\text{K}$, a vízé ennek 10–20-szorosa, a levegőé pedig kb. 100-szorosa. Továbbá a nedves levegőnek nagyobb a hőtágulási együtthatója, mint a száraz levegőnek. Valamint a hőmérséklet növekedésére a víz viszkozitása lecsökken, nő folyási készsége.

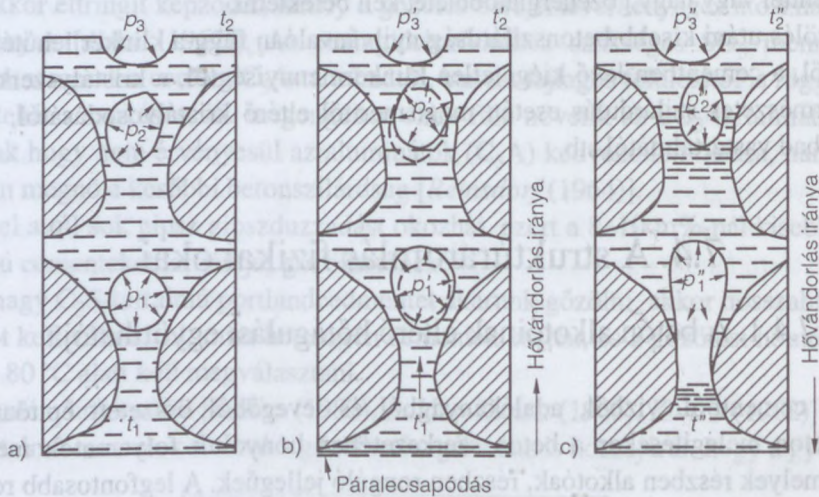
A szilárdulás kezdeti stádiumában levő beton szerkezetében keletkező komolyabb zavarokat az a túlnyomás okozza, amelyet a pórusvíz vándorlása hoz létre. Ezt a jelenséget Gorjajnov és Vekszer (1964) a következőképpen magyarázta.

A gőzölés előtt a vizsgált 1, 2 és 3 jelű, zárt légpórusban (7.4a ábra) a hőmérséklet azonos, így a belső nyomás is azonos, $p_1 = p_2 = p_3$. Nyomástöbblet tehát nem alakul ki.

A felfűtés időszakában a melegített betonban hőmérséklet-különbség jön létre. A levegő hőmérséklete az 1. jelű légpórusban nagyobb, mint a 2. jelűben és ott nagyobb, mint a 3. jelűben. Mivel a többi tényező azonos, a szerkezet belseje felé ható nyomástöbblet alakul ki, mivel $p_1 > p_2 > p_3$. A nyomástöbbletet a hőmérséklet-különbség, a szerkezet vastagsága a melegítés irányában és a zárt légbuborékok nagysága határozza meg (7.4b ábra).

A harmadik fázisban a beton hőmérséklete a hidratációhő miatt meghaladja a kamra hőmérsékletét. Ekkor a 3. jelű légpórusban legnagyobb a hőmérséklet és a légnyomás, így a nyomástöbblet a felszín felé irányul, abban az irányban indul meg a vízvándorlás (7.4c ábra).

A második és a harmadik fázis határvonala a 7.4b és 7.4c ábrán ott van, ahol a beton hőmérsékleti görbéje metszi a kamra hőmérsékleti görbéjét.



7.4. ábra. Páraevaporáció a gőzölt betonban [Gorjajnov–Vekszler (1964)]

a) a felfűtés kezdetén; b) a felfűtés tartamán: hőmozgás felszíntől lefelé;

c) az izotermikus érlelés tartamán páraevaporáció a betonból kifelé

A felfűtési periódusban tehát a betonból víz nem távozik el, a nyomásirány befelé hat. Mivel a felfűtés kezdetén a beton szilárdsága elhanyagolható, a hirtelen térfogatváltozást a szabad felszín közelében fellazulás követi, ami pórustartalom-növekedést, esetleg repedéseket eredményez, aminek következménye a nagyobb vízfelvétel, a vízzáróság, a fagy- és sózásállóság, valamint a korrózióállóság csökkenése.

Összefoglalva: a felfűtés szakaszában struktúraromlást elősegítő tényezők:

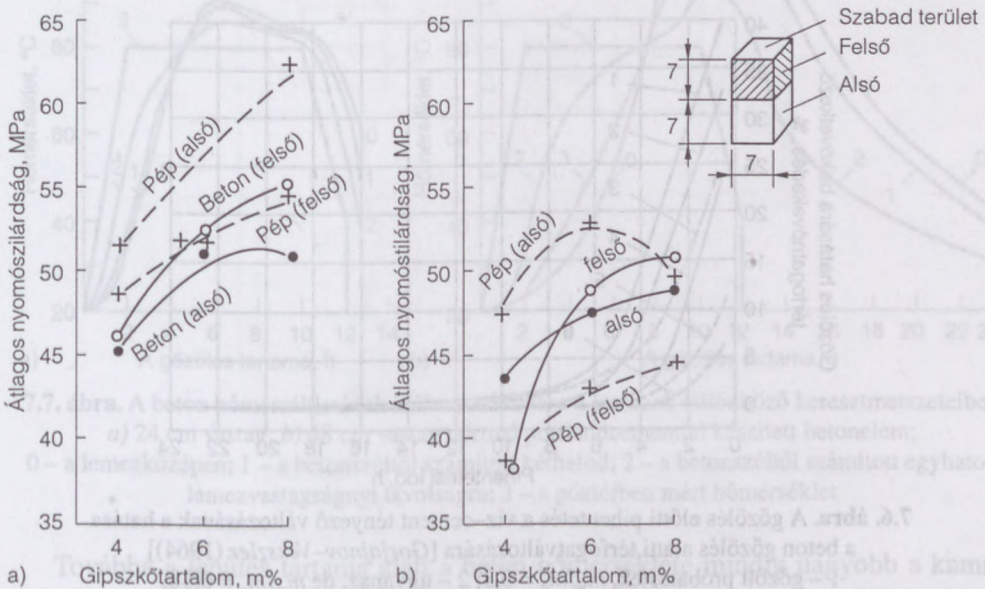
- a nagy víz- és levegőtartalom,
- rövid pihentetés (ill. a pihentetés teljes hiánya),
- a sablon nyitottsága (zárt sablonban nincs károsodás, mert a belső nyomást a sablon felveszi),
- a gyors felfűtés.

A struktúraromlást néhány példán mutatjuk be.

7.1. példa. *Venuat* (1974) repedések keletkezését figyelte meg vékony metszetekben. Ezek a repedések gyakran a pórusokból indulnak ki, rendszerint a próbatest göztérrel érintkező felső részeiben, amikor a beton húzószilárdsága még kicsi. Rövid pihentetés esetén 30–50 %-os térfogatnövekedést is mért.

7.2. példa. Kutatásaink során [Balázs (1983)] olyankor sikerült gőzölés közben létrejött repedést fénymikroszkóppal megfigyelni, amikor a péptesteket 90 °C-ra gyorsan fűtöttük fel. Ilyen repedéseket betonban nem észleltünk (folyós betont nem gőzöltünk). Továbbá – 210-szeres nagyításban – jól megfigyelhetők voltak a légpórusba benőtt szabályos hatszögletű ettringitkristályok.

7.3. példa. *Kilián és Székely* (1967) kísérletei szerint 7×7×14 cm pép- és beton próbatestek gőzölése esetén a szabad felületű felső pép-kockarész szilárdsága lényegesen kisebb volt, mint az alsó kockarészé (7.5. ábra). Beton esetében már nem ilyen egyértelmű a helyzet. Magyarázata az, hogy a pépben több a víz és a levegő, tehát felfűtéskor érzékenyebb a fellazulásra. Meghatározták az így gőzölt két réteg vízfelvételét (7.1. táblázat).



7.5. ábra. A szabad felület hatása gőzölt pép- és betonkockák nyomószilárdságára. a) 6 órán át 80 °C-os gőzölés; b) 6 órán át 70 °C-os gőzölés [Palotás–Kilián–Balázs (1968)]

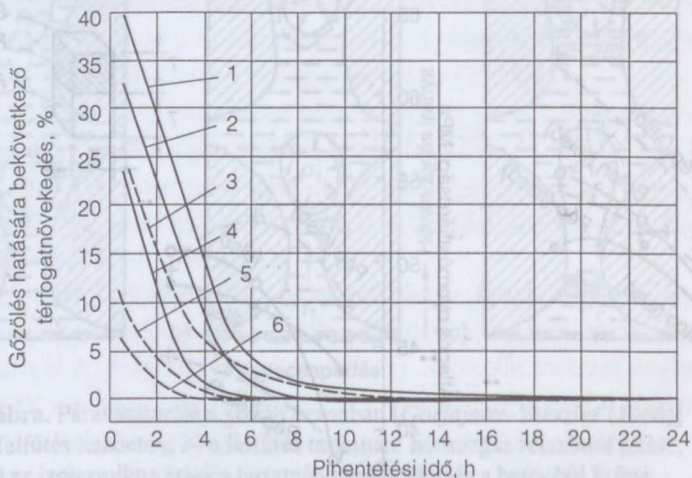
7.1. táblázat. 80 °C-on 6 órán át gőzölt cementkő vízfelvétele fokozatos vízszintemelkedéssel az alsó és a felső kockában [Palotás–Kilián–Balázs (1968)]

A kockahelyzete	Pihentetés nélkül gőzölt	2 órás pihentetés után gőzölt
Felső	7,6 V%	6,4 V%
Alsó	2,0 V%	1,8 V%
Átlag	4,8 V%	4,6 V%

A felső, levegővel érintkező rétegnek nagyobb lett a vízfelvétele (kapillaris porozitása), mint az alsó rétegé. Látható a pihentetés struktúrajavító hatása is. A 7.5. ábra azt is szemlélteti, hogy gőzöléskor indokolt a cementben a szokásosnál több gipszkő.

7.4. példa. Gorjajnov és Vekszler (1964) kimutatta, hogy a víz–cement tényező csökkentésével és a beton pihentetésének növelésével csökken a beton káros duzzadása, amely a porozitás növekedésére utal (7.6. ábra).

Azt sem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a felfűtés szakaszában annál nagyobb a hőmérséklet-különbség a légtér és a beton között, minél gyorsabb a felfűtés. Ha a beton hőmérséklete a harmatpont alá csökken, akkor pára csapódik le a beton felületére, amely egyrészt növeli a víz–cement tényezőt, másrészt lágyítja a felületet. A 7.6. ábra azt is szemlélteti, hogyha a betont műanyag filmmel vonjuk be [Gorjajnov–Vekszler (1964)], akkor ez ugyan nem akadályozza meg a beton térfogatváltozását, tehát a kezdeti struktúraromlást, de mértékét csökkenti. Ugyanis csökken a melegítés első periódusa alatt a belső nyomástöbblet. A kísérlet során a beton szilárdsága 10–23%-kal lett nagyobb, mint a burkolatlan betoné.



7.6. ábra. A gőzölés előtti pihentetés a víz–cement tényező változásának a hatása a beton gőzölés alatti térfogatváltozására [Gorjajnov–Vekszler (1964)]

- 1 – gőzölt próbatestek, $m_w/m_c = 0,3$; 2 – ugyanaz, de $m_w/m_c = 0,38$;
 3 – ugyanaz, de $m_w/m_c = 0,45$; 4 – nedvességlecsapódás ellen védett, melegített próbatest, $m_w/m_c = 0,3$; 5 – ugyanaz, de $m_w/m_c = 0,38$; 6 – ugyanaz, de $m_w/m_c = 0,45$

7.4.2. Vízforgalom a beton és a gőztér között

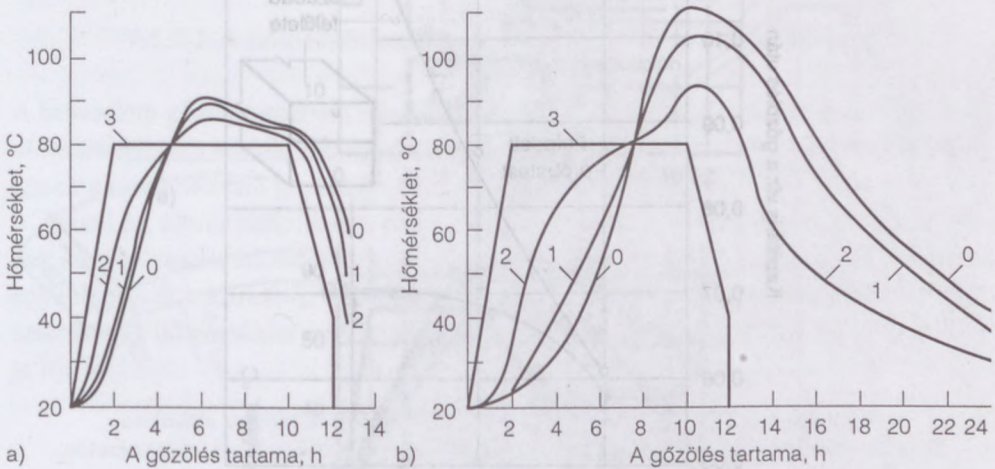
Termofizikai törvényekből következik, hogyha a betontestben gőznyomásváltozás keletkezik, akkor az belső feszültségeket és a betonban levő szabad víz vándorlását idézi elő, s ez a cementkő szerkezetromlásához vezethet. Márpedig, ahogy az előző fejezetben bemutattuk, ezt a gőznyomáskülönbséget nem tudjuk elkerülni.

A hőmérséklet-kiegyenlítődés után a beton hőmérséklete eléri, majd a keletkező hidratációhő miatt túllépi a gőztér hőmérsékletét.

Különösen a vastagabb elemek belsejében emelkedik a hőmérséklet a kamra hőmérséklete fölé (7.7. ábra).

Véleményünk szerint a hőmérséklet-emelkedés mértéke függ a cement ásványi összetételétől és mennyiségétől, a betontest méreteitől, a sablon zártságától. Kizsuzott állapotban gőzölt kisméretű betontestek, sablonban gőzölt vékony falú vasbeton elemek, valamint sűrű vasalás esetén a keletkezett hidratációhő hamar átadódik a környezetnek és legfeljebb 1–5 °C hőmérséklet-emelkedést eredményez.

Ha a beton hőmérséklete nagyobb, mint a gőztéré, akkor víz távozik el a betontól, a betonban kialakuló gőznyomás-különbségek hatására. A beton még akkor is kiszáradhat, ha a gőztér légnedvességtartalma 100%.



7.7. ábra. A beton hőmérsékletének időbeni változása a lemezek különböző keresztmetszeteiben
 a) 24 cm vastag; b) 48 cm vastag normál portlandcementtel készített betonelem;
 0 – a lemez közepén; 1 – a betonszéltől számított kéthatod; 2 – a betonszéltől számított egyhatod
 lemezvastagságnyi távolságra; 3 – a gőztérben mért hőmérséklet

Továbbá a lehűtés tartama alatt a beton hőmérséklete mindig nagyobb a kamra hőmérsékleténél. Ennek következtében a betontól a le nem kötött kapilláris víz elpárologhat, a kamrából kivett beton világos színű, száraz tapintású lesz. Kedvezőtlen körülmények között, amikor az elemeket téli időben gyorsan hűtik le, a betontól 1,5 MPa gőznyomás is kialakulhat [Reinsdorf (1964)].

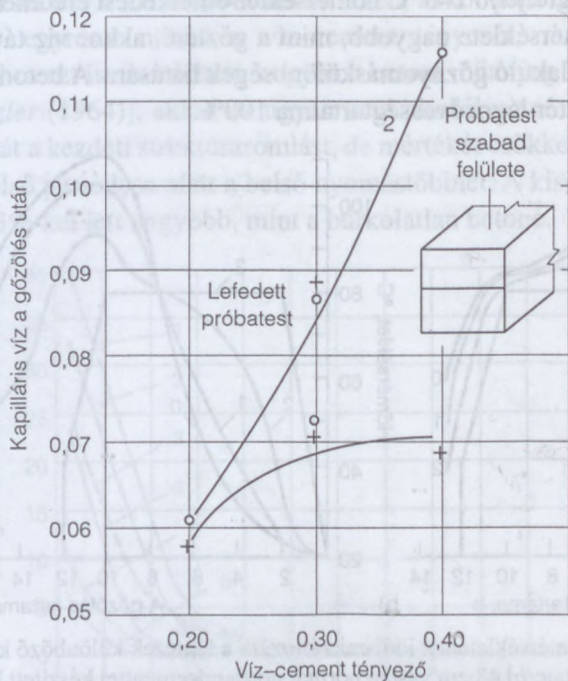
A kötetlen víz eltávozásának a veszélye különösen a vékony (vastagság 10–15 cm-nél kisebb) elemek esetén veszélyes, ezért ezeket nem szabad 80 °C feletti hőmérsékleten gőzölni [Gyengő (1979), Kajszer (1964)]. Vastag elemek esetén (kb. 40 cm) a kiszáradás veszélye sokkal kevésbé áll fenn.

Ha a kötetlen víz a vízforgalom hatására eltávozik, akkor megszűnhet a hidratáció folyamata. Nem szabad elfelejteni, hogy amikor nagy hőmérsékleten gyorsítani

akarjuk a cement szilárdulását, akkor végső soron a víz rögzítését (kalcium-hidro-szilikát formájában) akarjuk gyorsítani.

A gőztér és beton hőmérsékletének a különbsége a káros vízforgalomnak csak egyik oka. A másik oka lehet az, hogy nincs meg a gőztér 100%-os relatív légnedves-ségtartalma.

7.5. példa. A 7.8. ábrán látható, hogy a gőzölés befejeztével nagyobb lett a beton kapilláris víztartalma a felső, mint az alsó kockarészben. Míg kis víz-cement ténye-ző esetén alig volt eltérés, az rohamosan nőtt a víz-cement tényező növekedésével.



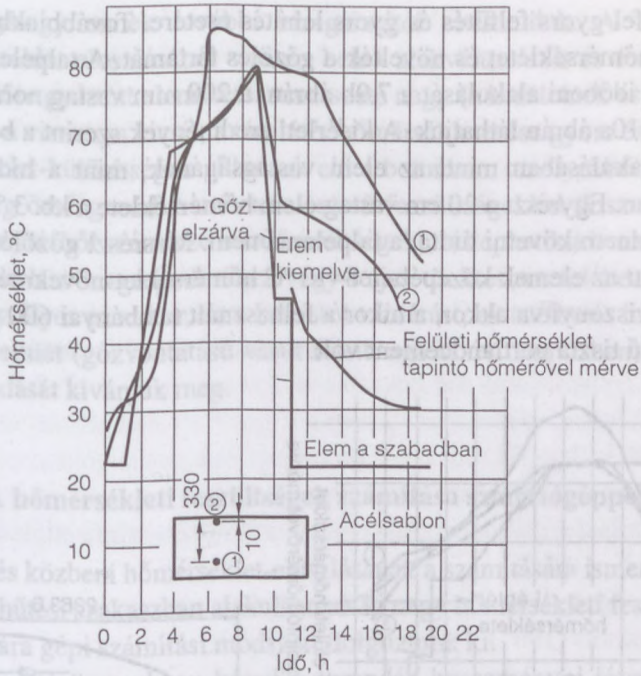
7.8. ábra. Gőzölt cementkőben a gőzölés után maradó kapilláris víztartalom.

Gőzölés 80 °C-on 6 óra [Kilián-Székely (1967)]

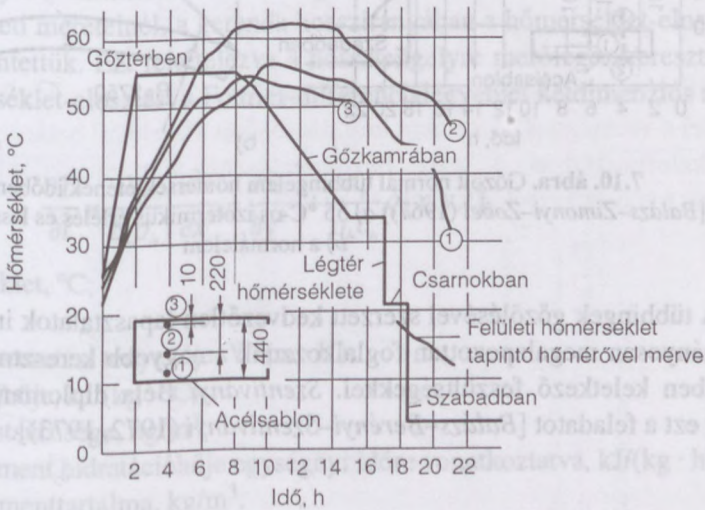
1 – a szabad felület közelében; 2 – a próbatest belsejében

7.6. példa. A Beton- és Vasbetonipari Művek (BVM) Budapesti Gyárában a vas-beton tübbinggyártás kezdetén – a többi előre gyártott elemnél megszokott módon – gyártották az elemeket. Ez azt jelenti, hogy a gőzölőkamrában elhelyezett elemekre ráengedték a teljes gőzt, azt igyekeztek tartani 70–80 °C-on, a gőzt elzárták, majd az elemeket a gőzölőkamrából kiemelték, kiszerezelték és a tárolóterbe szállították.

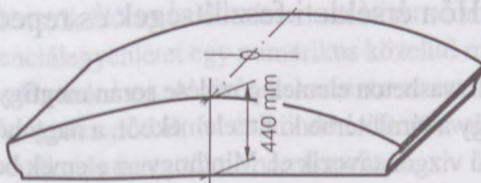
Az előírt betonminőség B400 jelű vízzáró beton volt. A gyártás során tatabányai 600-as cementet használtak, kb. 485 kg/m³ cementtartalommal, a víz-cement ténye-ző kb. 0,36, az adalékanyag finomsági modulusa (körlyukú rostán) 5,0–5,5, a legna-gyobb szemnagysága 32 mm volt. A betont kényszerkeverővel keverték, rázóasztal-on tömörítették. A 7.9a ábrán a talpelemekben mért hőmérséklet időbeni alakulását



a)



b)



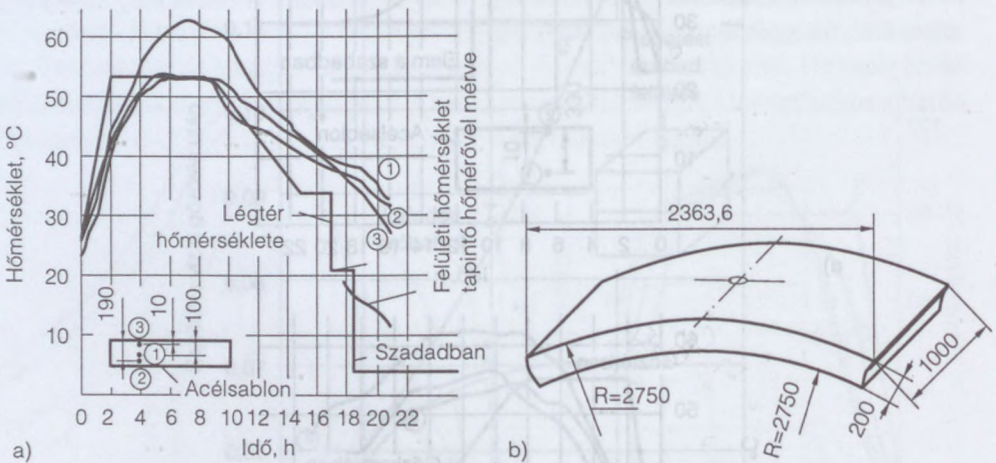
c)

7.9. ábra. Gőzölt tübbing talpelem hőmérsékletének időbeni alakulása

[Balázs-Zimonyi-Zobel (1967)] a) 70–80 °C-os izotermikus érlelés és gyors lehűtés esetén;

b) kb. 55 °C-os izotermikus érlelés és lassú lehűtés esetén; c) a talpelem

tüntettük fel gyors felfűtés és gyors lehűtés esetére. Továbbiakban csökkentették a gőzölési hőmérsékletet és növelték a gőzölés tartamát. A talpelemben kialakult hőmérséklet időbeni alakulását a 7.9b ábrán, a 200 mm vastag normál elemben kialakultat a 7.10a ábrán láthatjuk. A kísérleti eredmények szerint a beton hőmérsékletének az alakulásában mind az elem vastagságának, mint a hidratációhőnek nagy szerepe van. Egyrészt a 20 cm vastag elem hőmérséklete a kb. 3 °C/h lehűtési sebességet majdnem követni tudta, a talpelemé nem. Másrészt gőzölés közben a hidratációhő miatt az elemek közepében 8–10 °C hőmérséklet-növekmény adódott az elem széléhez viszonyítva akkor, amikor a felhasznált tatabányai 600 pc a legkisebb hidratációhőjű tiszta portlandcement volt.



7.10. ábra. Gőzölt normál tübbingelem hőmérsékletének időbeni alakulása [Balázs–Zimonyi–Zobel (1967)] a) 55 °C-os izotermikus érlelés és lassú lehűtés esetén; b) a normálem

A tübingek gőzölésével szerzett kedvezőtlen tapasztalatok indokolták, hogy tudományosan megalapozottan foglalkozzunk a nagyobb keresztmetszetű gőzölt elemekben keletkező feszültségekkel. Szentiványi Béla diplomamunkájában oldotta meg ezt a feladatot [Balázs–Berényi–Szentiványi (1972, 1973)].

7.4.3. Hőmérsékleti feszültségek és repedések

Előre gyártott beton-, ill. vasbeton elemek gőzölése során megfigyelhetjük, hogy a gőztérből a gyártótérbe vagy a tárolótérbe kivitt elemekből, a nagy hőmérséklet-csökkenés miatt, nagy mennyiségű vízgőz távozik el. Minthogy az elemek belseje nehezebben hűl le és jobban megtartja a beton szabad víztartalmát, mint a külseje, a betonban egyenlőtlen hőmérséklet és nedvességtartalom alakul ki. Az egyenlőtlen nedvességtartalom eredménye a betontömbön belüli gátolt zsugorodás. Ez valószínűen nem okoz nagy

feszültségeket, úgyhogy ennek további vizsgálatától eltekintünk. A betontömb egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásából szintén belső alakváltozások és feszültségek lépnek fel. Ha az előre gyártott elem keresztmetszete nagy (a területnek és a keresztmetszeti felületnek a viszonya kicsi), a tárolótér hőmérsékletesése gyors és nagy, akkor olyan hőmérséklet-különbségek állhatnak elő a betonban, amelyekből származó feszültségek, esetleg összegeződve más természetű feszültségekkel (kiszerezési, gátolt zsugorodási, feszítésből származó húzófeszültségek), túlléphetik a beton húzószilárdságát és a betonelem megrepedéséhez vagy teljes tönkremeneteléhez vezethetnek. Különösen veszélyes ez akkor, ha a betontól vízárast, az acélbetét fokozottabb korrózió elleni védelmét (gőzvontatású vasút felett, agresszív talajvízben) a feszítőhuzalok biztos tapadását kívánjuk meg.

7.4.3.1. A hőmérsékleti feszültségek számítása számítógéppel

A betonelem gőzölés közbeni hőmérséklet-eloszlásának a számítására ismerünk módszereket. Mivel a lehűtési szakaszban alakulhatnak ki nagy hőmérsékleti feszültségek, ennek a kiszámítására gépi számítási módszert dolgoztunk ki.

Mivel az előregyártó üzemekben készülő gerendák hosszmeretei jóval nagyobbak a keresztmetszeti méreteinél, a gerenda hosszirányában a hőmérséklet-eloszlást egyenletesnek tekintettük. Ezt feltételezve a hossz tengelyre merőleges keresztmetszetekben a hőmérséklet-eloszlást a Fourier-differenciálegyenlet kétdimenziós alakja írja le:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_b}{c_b \rho_b} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + \frac{m_c}{\rho_b c_b} \dot{q}(x, y, t),$$

ahol T a hőmérséklet, °C;

t az idő, h;

λ_b a beton hővezetési tényezője, W/(m · K);

c_b a beton fajhője, kJ/(kg · °C);

ρ_b a beton testsűrűsége, kg/m³;

\dot{q} az 1 kg cement hidratacióhője egységnyi időre vonatkoztatva, kJ/(kg · h);

m_c a beton cementtartalma, kg/m³.

A hőtani anyagjellemzők időbeni változását a számítás során nem vettük tekintetbe. A Fourier-féle differenciálegyenletet egy numerikus közelítő módszerrel, az ún. véges elemek módszerével oldottuk meg. A gerenda keresztmetszetét tetszőleges háromszögű elemekből álló részekre osztottuk fel és minden időintervallumban a hőmérsékleti függvény sarokponti értékeit tekintettük ismeretleneknek.

A hőmérsékleti feszültségek számítása során a rugalmasságtan szokásos egyszerűségeit alkalmaztuk (a beton homogén, izotrop, érvényes a Hooke-törvény és a Bernoulli-Navier-féle feltevés). A beton rugalmassági modulusát a lehűtés viszonylag rövid

intervallumban állandónak tekintettük és a lassú alakváltozás hatását is elhanyagoltuk. Vasbeton gerendák esetében az első feszültségi állapot közelítéseit alkalmaztuk.

A feszültséget is a véges elemek módszerével számítottuk. A hőmérséklet-eloszlás meghatározása során felvett háromszög-felosztást használtuk, az egyes elemeket csupán a háromszögek sarokpontjain képeztük összekapcsoltnak és e csomópontok elmozdulásai lettek a feladat alapvető ismeretlen paraméterei (így a kontinuumra vonatkozó feladatot visszavezettük egy síkbeli szerkezet mozgásmódszerrel elvégzendő megoldására). A hőmérsékletet az egyes háromszögeken belül állandónak tekintettük és ezt a sarokponti értékek számtani átlagaként képeztük.

A hőtani anyagjellemzőkre az irodalomban eltérő értékeket találtunk, ezeket a következőképpen vettük fel:

$$\lambda_b = 3,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}),$$

$$c_b = 1,08 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}),$$

$$a = 23 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \text{ (hőátadási tényező).}$$

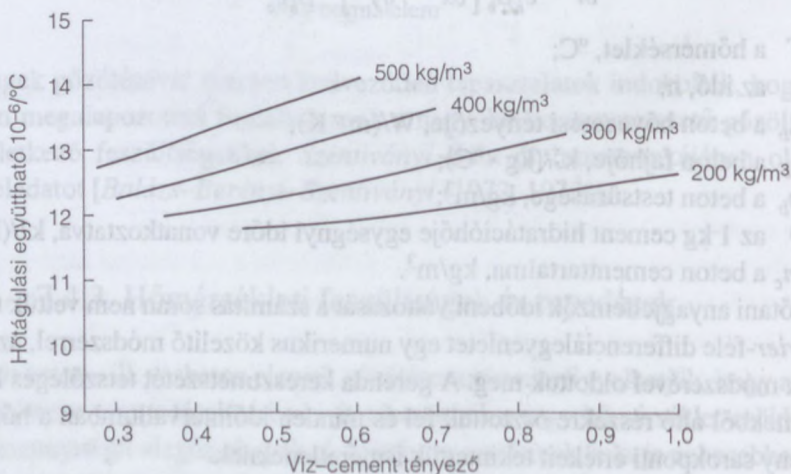
A hőtágulási együttható értékét *Palotás (1970)* szerint vettük fel (7.11. ábra):

$$\alpha_b = 12,8 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$$

A beton kezdeti *húzási és nyomási rugalmassági modulusát* azonosnak tételeztük fel és a [*Palotás (1961), Palotás–Balázs (1980)*]

$$E_{0,c} = 55000 \frac{f_{cm, cube}}{f_{cm, cube} + 20}$$

képlettel számítottuk. A rugalmassági modulusát állandónak tételeztük fel és ez meg is felel a valóságnak. A cement hidratációhőjét kísérlettel határoztuk meg hőáramlásos kaloriméterben. A beton húzószilárdságát a nyomószilárdságából *Hellmann (1969)* nyomán becsültük meg: $f_{ct} = 0,76 f_{cm, cube}^{2/3}$.



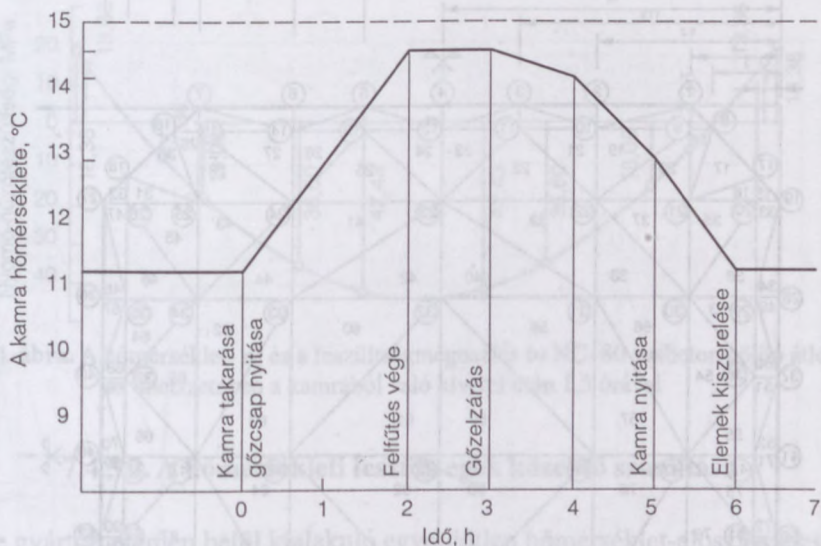
7.11. ábra. A beton hőtágulási együtthatójának változása a víz–cement tényező függvényében kvarcalapú adalékanyag és különböző cementtartalom esetére [*Palotás (1970)*]

$$\alpha_c = 21 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}; \alpha_a = 11 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$$

A részletes levezetést és a számítógépi programot [Balázs–Berényi–Szentiványi (1972, 1973)] tartalmazza. Gépi számítással kimutattuk, hogy a fajhőnek és a beton testsűrűségének az ingadozása alig befolyásolja a keletkező maximális feszültséget, ugyanakkor a hővezetési tényező és a hőátadási tényező változásának nagy a hatása.

A gépi számítás eredményeit összevetettük az Építőanyagok Tanszéken végzett kísérletek eredményeivel. Az eredmények meglehetősen jó egyezést mutattak.

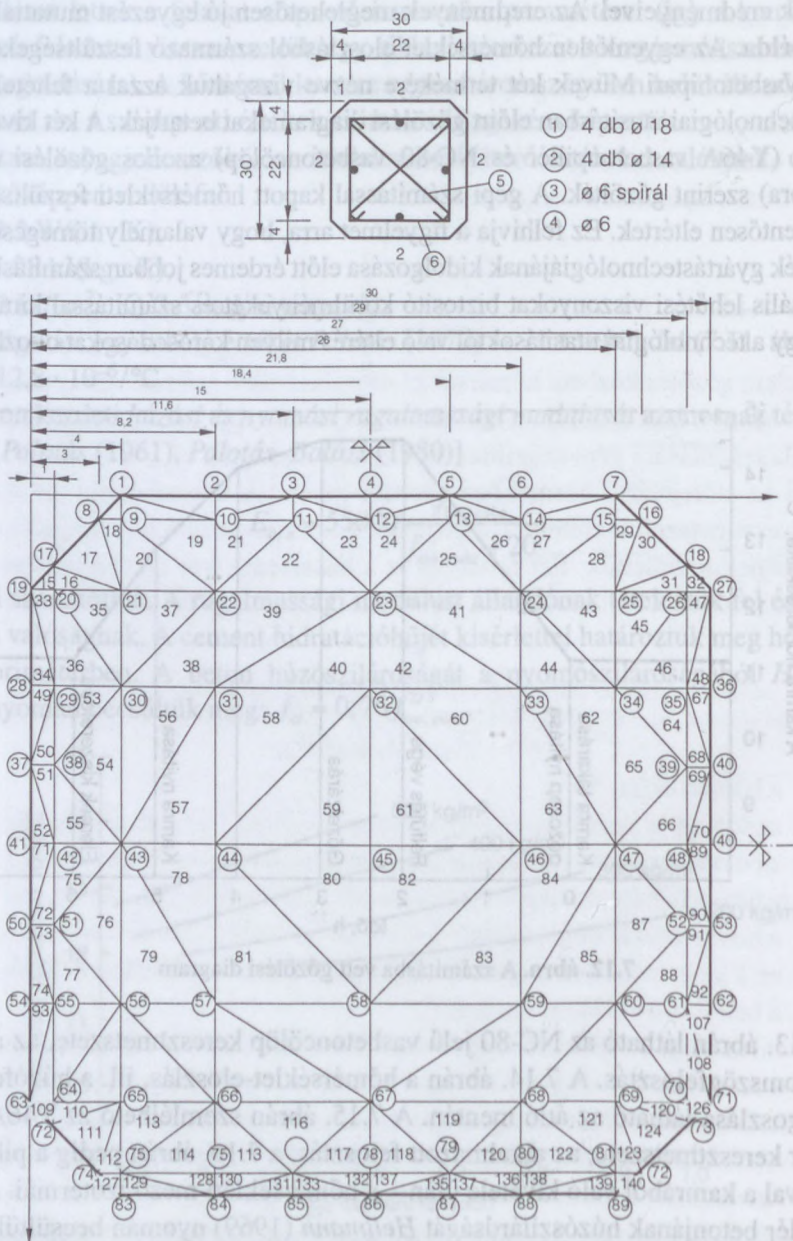
7.7. példa. Az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból származó feszültségeket a Beton- és Vasbetonipari Művek két termékére nézve vizsgáltuk azzal a feltételezéssel, hogy a technológiai utasításban előírt gőzölési diagramokat betartják. A két kiválasztott terméket (Y46A vasbetonpiller és NC-80 vasbetoncölöp) azonos gőzölési diagram (7.12. ábra) szerint gőzölték. A gépi számítással kapott hőmérsékleti feszültségek viszont jelentősen eltértek. Ez felhívja a figyelmet arra, hogy valamely tömegesen gyártott termék gyártástechnológiájának kidolgozása előtt érdemes jobban számításba venni az optimális lehűtési viszonyokat biztosító körülményeket és számítással kimutatható az is, hogy a technológiai utasításoktól való eltérés milyen károsodásokat okozhat.



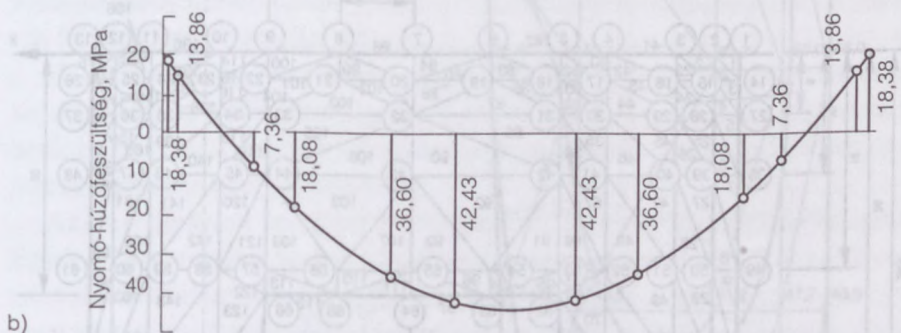
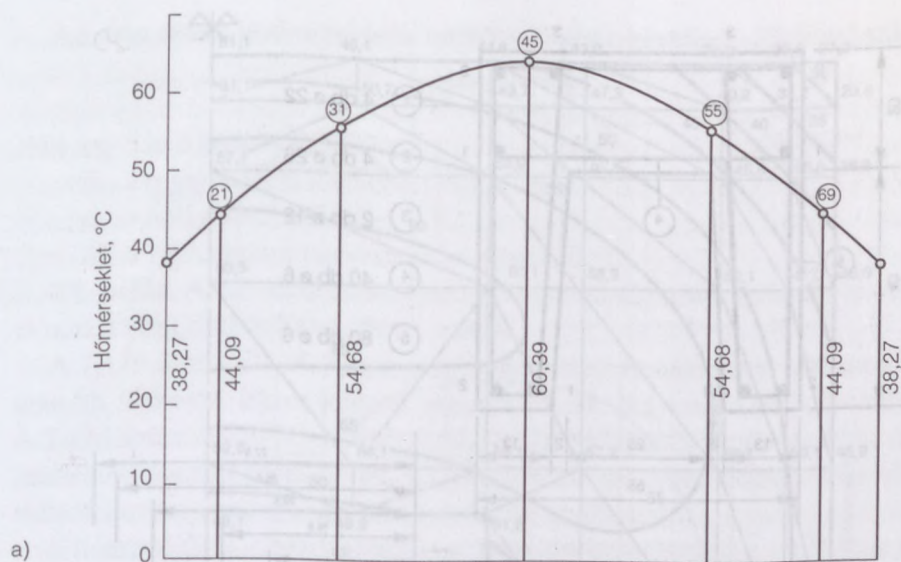
7.12. ábra. A számításba vett gőzölési diagram

A 7.13. ábrán látható az NC-80 jelű vasbetoncölöp keresztmetszete, az alkalmazott háromszögfelosztás. A 7.14. ábrán a hőmérséklet-eloszlás, ill. a húzófeszültségek megoszlása látható az átló mentén. A 7.15. ábrán szemléltethető az Y46A vasbetonpiller keresztmetszete, az alkalmazott felosztás, a 7.16. ábrán pedig a pillérben – 1 ½ órával a kamrából való kivétele után – a hőmérsékleti mező izotermái. A cölöp, ill. a pillér betonjának húzószilárdságát Hellmann (1969) nyomán becsültük meg és megállapítottuk, hogy a kapott maximális húzófeszültségi értékek a cölöpnél a húzószilárdság alatt maradtak, viszont a vasbetonpillérenél a sarkok környezetében a

kapott húzófeszültségek a húzószilárdság kétszeresét is meghaladták. Itt tehát feltétlenül repedések keletkeztek. A kutatás során kitűnt, hogy helyesnek bizonyult az a gyakorlat, miszerint abbahagyták az elemeknek közvetlenül a kizsaluzás utáni loscsolását, mivel ez a hőátadási tényezőt jelentősen megnövelte és a hőmérséklet-eloszlás egyenlőtlenségét még jobban fokozta.



7.13. ábra. Az NC-80 jelű cölöp vasalása és a hőmérsékleti feszültségek számításához használt háromszögfelosztás

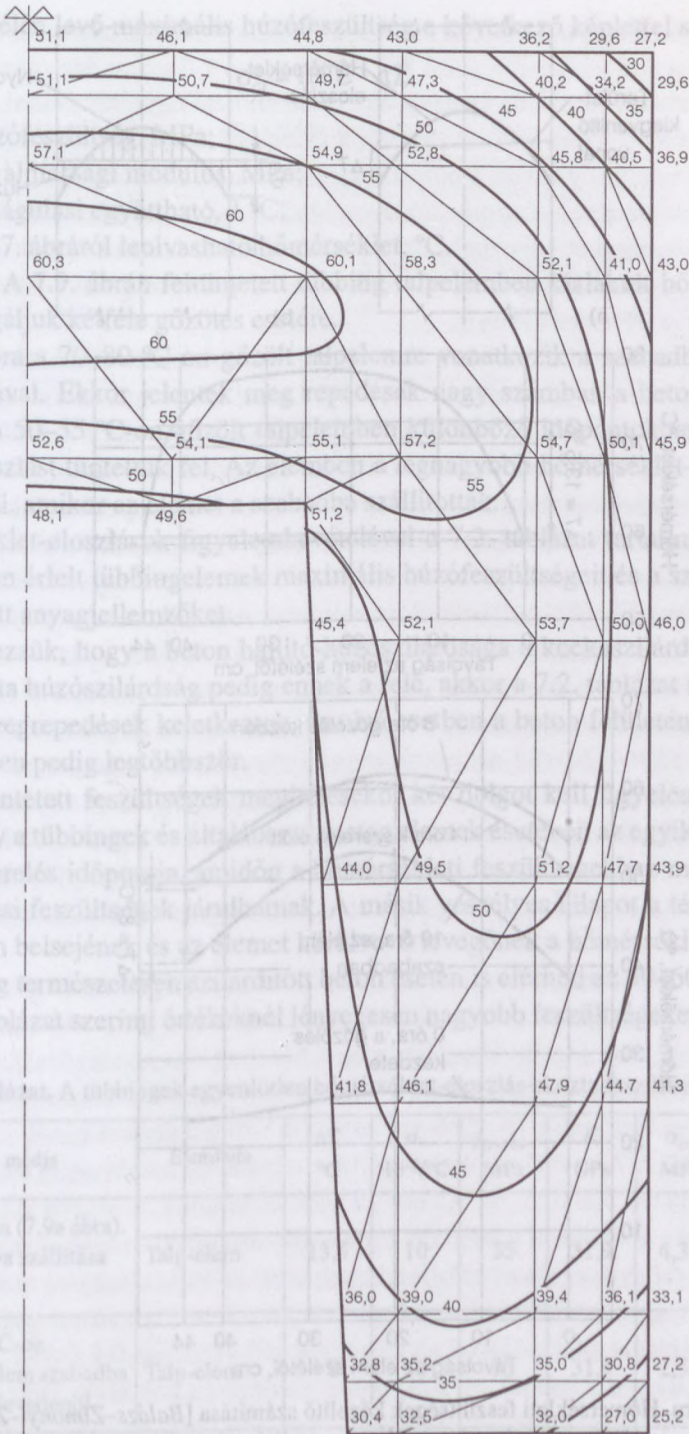


7.14. ábra. A hőmérséklet- a) és a feszültségmegoszlás b) NC-80 vasbeton cölöp átlós metszetében a kamrából való kivétel után 1,5 órával

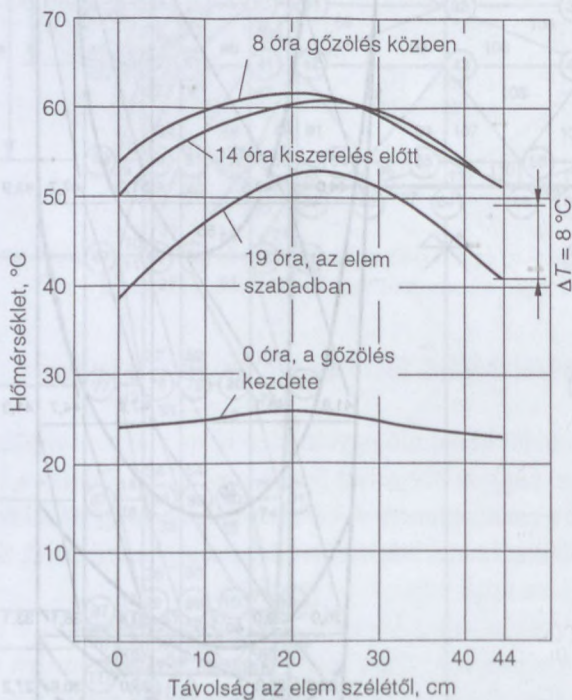
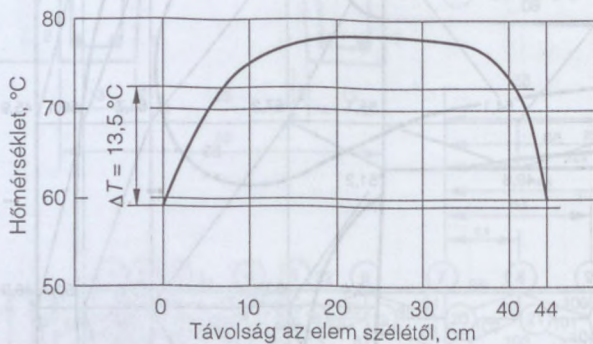
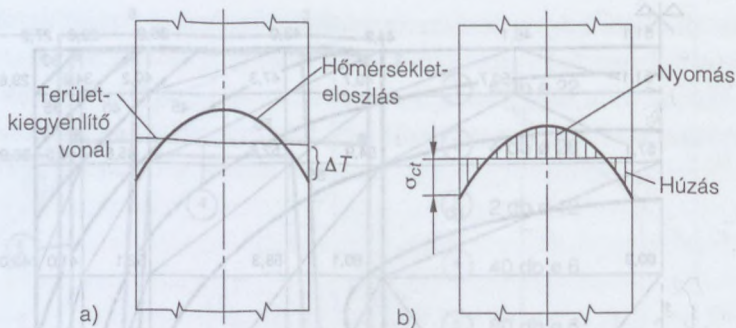
7.4.3.2. A hőmérsékleti feszültségek közelítő számítása

Az előre gyártott elemen belül kialakuló egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás megközelítése tisztán elméleti úton nagyon bonyolult feladat, mivel a hőátadás a beton zsaluzott oldalán kisebb, mint a zsaluzatlanon. A keresztmetszet mentén kialakuló hőmérséklet-eloszlást legmegbízhatóbban kísérletekkel lehet meghatározni. A feszültségek meghatározásának ez a része tehát teljesen megbízható.

Az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból származó feszültségeket a 7.17a ábrán feltüntetett egyszerűsített eljárással határozhatjuk meg. Az elem szélén a legkisebb hőmérsékleteket összekötjük. Ezzel a vonallal húzunk párhuzamosat úgy, hogy a vonal feletti terület azonos legyen a vonal alatt lévő, a hőmérsékleti görbén kívüli területekkel (7.17a ábra). Előbbiből a nyomó-, utóbbiból a húzófeszültségek számíthatók (7.17b ábra).



7.16. ábra. A hőmérsékleti mező izotermái az Y 46 A jelű vasbeton pillér keresztmetszetében, 1,5 órával a kamrából való kivétel után (a számok °C-ot jelentenek)



7.17. ábra. Hőmérsékleti feszültségek közelítő számítása [Balázs-Zimonyi-Zobel (1967)]

a) ΔT meghatározása területkiegyenlítéssel; b) feszültségeloszlás;

c) hőmérséklet-eloszlás a talpelemben 70–80 °C-os gőzölés esetén kb. 1 órával az elemek szabadba szállítása után; d) 50–55 °C-os gőzölés esetén különböző időpontokban

Az elem szélén levő maximális húzófeszültség a következő képlettel számítható:

$$\sigma_{ct} = \alpha \cdot E \cdot \Delta T,$$

ahol σ_{ct} a húzófeszültség, MPa;

E a rugalmassági modulus, MPa;

α a hőtágulási együttható, $1\text{ }^\circ\text{C}$;

ΔT a 7.17. ábráról leolvasható hőmérséklet, $^\circ\text{C}$.

7.8. példa. A 7.9. ábrán feltüntetett tübbing talpelemben kialakult hőmérséklet-eloszlást vizsgáljuk kétféle gőzölés esetére.

A 7.17c ábra a $70\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$ -on gőzölt talpelemre vonatkozik a szabadba szállítás után kb. 1 órával. Ekkor jelentek meg repedések nagy számban a betonfelületen. A 7.17d ábrán $50\text{--}55\text{ }^\circ\text{C}$ -on gőzölt talpelemben különböző időpontokban mért hőmérséklet-eloszlást tüntettük fel. Az elemben a legnagyobb hőmérséklet-különbség akkor lépett fel, amikor az elemet a szabadba szállították.

E hőmérséklet-eloszlások figyelembevételével a 7.2. táblázat tartalmazza a különböző módon érlelt tübbingelemek maximális húzófeszültségeit és a számítás során feltételezett anyagjellemzőket.

Ha feltételezzük, hogy a beton hajlító-húzószilárdsága a kockaszilárdság $0,125$ -szöröse, a tiszta húzószilárdság pedig ennek a fele, akkor a 7.2. táblázat szerint érthető, hogy kéregrepedések keletkeztek, az első esetben a beton felületén mindig, a második esetben pedig legtöbbször.

Az itt feltüntetett feszültségek megítélésekor két dolgot kell figyelembe venni. Egyik az, hogy a tübingek és általában a vastag elemek esetében az egyik veszélyes állapot a kiszerezés időpontja, amidőn a hőmérsékleti feszültségekhez még nagyon nagy kiszerezési feszültségek járulhatnak. A másik veszélyes állapot a téli időszak, amikor a beton belsejének és az elemet körülvevő levegőnek a hőmérséklete közötti különbség még természetesen szilárdított beton esetén is elérheti az $50\text{--}60\text{ }^\circ\text{C}$ -ot. Ez pedig a 7.2. táblázat szerinti értékeknél lényegesen nagyobb feszültségeket hoz létre.

7.2. táblázat. A tübingek egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás okozta feszültségei

Szilárdítás módja	Elemfajta	ΔT , $^\circ\text{C}$	α , $10^{-6}/^\circ\text{C}$	$f_{c, cube}$, MPa	E , GPa	σ_{ct} , MPa	f_{ct} , MPa
Gőzölés $80\text{ }^\circ\text{C}$ -on (7.9a ábra). Az elem szabadba szállítása után 1 órával	Talp-elem	13,5	10	35	31,9	4,31	2,19
Gőzölés kb. $50\text{ }^\circ\text{C}$ -on (7.9b ábra). Az elem szabadba szállítása után közvetlenül	Talp-elem	8	10	35	31,9	2,55	2,19
Gőzölés kb. $50\text{ }^\circ\text{C}$ -on (7.10. ábra). Gőzölés közben	Normál elem	6,5	10	35	31,9	2,07	2,19

7.4.4. Hogyan védekezzünk a fizikai struktúraromlás ellen?

A zárt légbuborékok száma és nagysága csökkenthető egyrészt azáltal, hogy péptelített, ill. túltelített *tömör betont* készítünk (vibrálással, sajtolással), és így a betonba zárt levegőmennyiség kevés, a pórusok kicsik lesznek, másrészt azáltal csökkenthető, hogy a betonhoz olyan abszorbeáló anyagokat adunk, amelyek a szilárduló betonban mikrolégbuborékokat képeznek, ezeket a jelentékeny felszíni feszültségi erők lekötik, és így gyakorlatilag nem vesznek részt a nedvességvándorlási folyamatban [Gorjajnov és Veksler (1964)].

A betonban levő kötetlen víz kedvezőtlen (viszkozitást növelő) hatása csökkenthető azáltal, hogy kisebb víz–cement tényezőjű betont készítünk (a víz–cement tényező csökkenthető folyósítók, ill. képlékenyítők adagolásával, továbbá azáltal, hogy a betont pihentetjük a gőzölés megkezdése előtt). Kísérletekkel kimutatták [Fedorov (1964)], hogy a beton pihentetésének növelésével és a víz–cement tényező csökkentésével csökken a beton gőzölés alatt fellépő káros duzzadása (7.6. ábra). Más kísérletek szerint az optimális szilárdságot adó pihentetési idő és a cement kötéseideje között lineáris összefüggés áll fenn. Ebből következik, *hogy mindama tényezők, amelyek befolyásolják a cement kötéseidjét* (cement minősége, cement őrlésfinomsága, a víz–cement tényező, a külső hőmérséklet, a cementhez adagolt kiegészítő anyagok, mint pl. kötőanyagok), *befolyásolják a legkedvezőbb szilárdságot adó optimális pihentetési időt is.*

Fedorov (1964) szerint a struktúraromlás megelőzése szempontjából hatékony a fokozatos gőzölési ciklusok alkalmazása. Ha lehetséges, akkor a földnedves betonokat 1,5–2 órán át kell pihentetni, ami kb. a kötési idő kezdetének felel meg. Pihentetés nélkül csak nagyon nagy tömörségű (kis víz- és légtartalmú) földnedves és gyengén képlékeny betonokat célszerű gőzölni, mivel úgy nő a struktúraromlás veszélye, ahogy a konzisztencia eltolódik a képlékeny felé.

Mivel a hőmérsékleti és a nedvességi különbségek egybeesése növeli a vándorló nedvesség áramlásának az intenzitását, ezt befolyásolni lehet műanyagfilmes bevonással, amely csak kicsit változtatja meg a hőmérséklet viselkedését, de lényegesen csökkenti a belső nyomástöbbletet a felfűtés tartamán (7.6. ábra). A befedett próbatestek szilárdsága pedig 10–23%-kal nagyobb volt a fedetlenekénél.

7.9. példa. A 7.3. táblázat olyan kísérlet eredményeit tartalmazza, amelyiknél változott a pihentetési idő (0,5, ill. 3,5 óra), a gőzölés tartama, módja és különbözőképpen helyeztük el a kockákat a gőztérben. Egyeseket sablonban a szokásos módon, másokat ugyancsak sablonban, de az előzően behelyezett kockákra, megint másokat kiformázott állapotban, végül kiformázott állapotban, de nylonzsákba csomagolva.

A 7.3. táblázat adatai szerint a pihentetési idő változása 0,5 órától 3,5 órára a szilárdságot alig befolyásolta, ha a kockákat sablonban gőzöltük, akár az alsó sorban (zárt rendszer), akár a felső sorban (5/6-od részben zárt rendszer) helyeztük el azokat. A sablon nélkül gőzölt kockákénál viszont lényegesen nagyobb volt a sablonban gőzölt kockák szilárdsága és nagy volt a pihentetési idő növelésének a hatása is. Ha

a sablon nélkül gőzölt kockákat nylonzsákba helyeztük, javult a szilárdság. A növekedés mértéke nagyobb volt a 0,5 óráig, mint a 3,5 óráig pihentetett betonnal.

7.3. táblázat. A pihentetés és a sablon hatása a gőzölt beton szilárdságára [450 kg/m³ tatabányai 600-as p.c, 0,32-es víz–cement tényezőjű, földnedves beton, lassú felfűtés, lassú lehűtés, a sablon nélkül gőzölt kockák a készítés után azonnal kiszaluzva. Kockák élhossza: 7,07 cm]

A gőzölmódja	Pihen- tetési idő, h	A beton kockaszilárdsága, MPa			
		sablonban		Sablon nélkül gőzölve	Sablon nélkül nylonzsákban gőzölve
		alsó sablonban	felső sablonban		
60 °C-on 4 órán át tartó gőzölés	3,5	34,7	34,8	20,4	23,6
	0,5	37,1	35,0	11,2	17,9

A merev, zárt sablonban gőzölt beton lényegesen kedvezőbb helyzetben van, mint a zsaluzott állapotban gőzölt. A kutatók [Fedorov (1964), Mironov (1964)] általában egyetértenek abban, hogy a teljesen zárt sablonban gőzölt beton gőzölés utáni szilárdsága kb. 1,5-szerese a megfelelően pihentetett kiszaluzott állapotban gőzöltének.

A merev sablonban gőzölt próbatestek esetén a nyomástöbbletet felveszi a sablon. Mindebből az is következik, hogy a gyors szilárdítást, amelynél rövid a felfűtési idő és nagy az izotermikus hőmérséklet (90–100 °C), csak zárt sablonban szabad megvalósítani. Ha a sablon felülről nyitott, akkor ezt a betonfelületet lehetőleg meg kell terhelni [Fedorov (1964), Kunszt (1960)].

Az egyenlőten felmelegedés és lehűtés okozta káros belső feszültségeket a felfűtési és a lehűtési sebesség szabályozásával lehet csökkenteni. Különösen a felfűtési sebességre kell vigyázni, és azt a betonszerkezet méreteinek az ismeretében kell megállapítani.

Malinovszki abból kiindulva, hogy az elemeken belül maximálisan a 20 °C hőmérséklet-különbség a megengedett, továbbá, hogy 12 cm vastag elemeknél a 30 °C/h felfűtési sebesség a célszerű, k tényezővel való osztás útján a felfűtési sebesség csökkentését javasolta.

A k tényezőre javasolt értékek:

- ha $d = 12$ cm, akkor $k = 1,0$;
- ha $d = 15$ cm, akkor $k = 1,4$;
- ha $d = 27$ cm, akkor $k = 2,0$ (d a vastagság).

Az izotermikus érlelés és a lehűtés szakaszában úgy célszerű szabályozni a gőztér hőmérsékletét, hogy a beton hőmérséklete mindig a gőztér hőmérséklete alatt maradjon. Ekkor – 100% relatív légnedvességű térben – a beton nem veszít nedvességet. Ezt két hőmérővel ellenőrizhetjük, ezek közül az egyik beton, a másik a gőztér hőmérsékletét méri. Ez a hőmérsékletmérés azért is fontos, mert ismernünk kell a beton hőmérsékletét, mivel valójában gőzölési hőmérsékleten mindig a beton hőmérsékletét értjük. Kiszaluzott állapotban gőzölt 7,07 cm élhosszúságú kockának a

hőmérséklete még gyors felfűtés és lehűtés esetén is jól megegyezik a gőztér hőmérsékletével. A betontest méreteinek a növelésével az egyezés mind kevésbé áll fenn.

A beton gőzölése során általában úgy járnak el, hogy a műszaki irányelvekből vagy az irodalomból kiválasztják a cementre vonatkozó optimális vagy javasolt gőzölési hőmérsékletet, megszerkesztik a gőzölési diagramot és úgy szabályozzák a gőztér hőmérsékletét, hogy megfeleljen a gőzölési diagramnak (7.18. ábra 1 jelű). Ebben az esetben a beton hőmérséklete vastagabb méretek esetén a 3 jelű, vékonyabb méretek esetén a 2 jelű diagram szerint alakul. A betonhőmérséklet a hidratációhő miatt haladja meg a gőzölési diagramot.

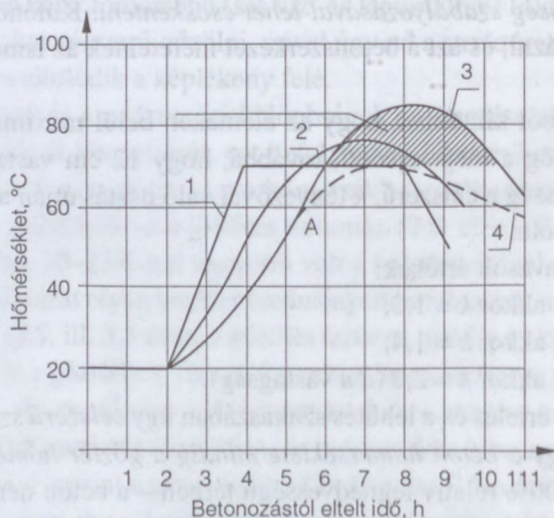
Ez a gőzölési mód az alábbi hibaforrásokat rejti magában:

a) Az optimálisnál nagyobb hőmérsékleten gőzölt betonnak már kisebb lesz a szilárdsága.

b) Minél nagyobb a hőmérséklet-különbség a gőzölési diagram és a normális hőmérséklet között, annál nagyobb mértékben szárad ki a beton, ami megint struktúraromlást, ill. szilárdságcsökkenést eredményez az optimálishoz képest. Ennek – mint ismert – az az oka, hogy a víz a nagyobb párányomású helyről a kisebb párányomású felé, azaz a melegebb helyről (beton közepe) a hidegebb hely felé (gőztér) vándorol. Ennek az az eredménye, hogy a beton még akkor is kiszáradhat, ha a gőztér relatív légnedvességtartalma 100%.

c) Ezeket a hibákat úgy követjük el, hogy közben energiapazarlás is bekövetkezik.

Tehát akkor járunk el helyesen, ha a gőzbevezetést úgy szabályozzuk, hogy a beton hőmérséklete a hidratációhő okozta felmelegedéssel együtt érje el az optimális hőmérsékletet (7.18. ábra 4 jelű görbe).



7.18. ábra. A hidratációhő szerepe a gőzölés során

1 – szokásos gőzölési diagram; 2 – a beton hőmérséklete kis keresztmetszetű;

3 – nagy keresztmetszetű, nagy hidratációhőjű cement használatakor;

4 – gőzölési diagram a hidratációhő figyelembevételével

Tehát A hőmérsékletnél megszüntetjük a gőzbevezetést. A hőmérséklet tovább nő a hidratáció hő hatására. A gőzölőrendszerrel függően előfordulhat, hogy nagy a hőmérsékletesés az elérendő hőmérséklethez képest. A gőzbevezetést ez esetben úgy kell szabályozni, hogy a hőmérsékletesés ne haladja meg az óránkénti 4 °C-ot.

7.5. A cementek gőzölhetősége

7.5.1. Egyenletek a gőzölhetőség előrebecslésére

Kajszer (1964) a gőzölési idő és a habarcsszilárdság közötti összefüggésre a következő egyenletet adta meg:

$$f_{c,b} = A (\lg t - \lg t_0),$$

ahol $f_{c,b}$ a gőzölt habarcs nyomószilárdsága, MPa.

Ez egy egyenes egyenlete, ha a gőzölés tartamát \lg léptékben ábrázoljuk. A az egyenes iránytangense.

Révy (1967) vizsgálta a Kajszer-egyenletet és 5 hazai cement felhasználásával kimutatta, hogy mind A , mind t_0 függ az izotermikus érlelés hőmérsékletétől és a cement fajtájától.

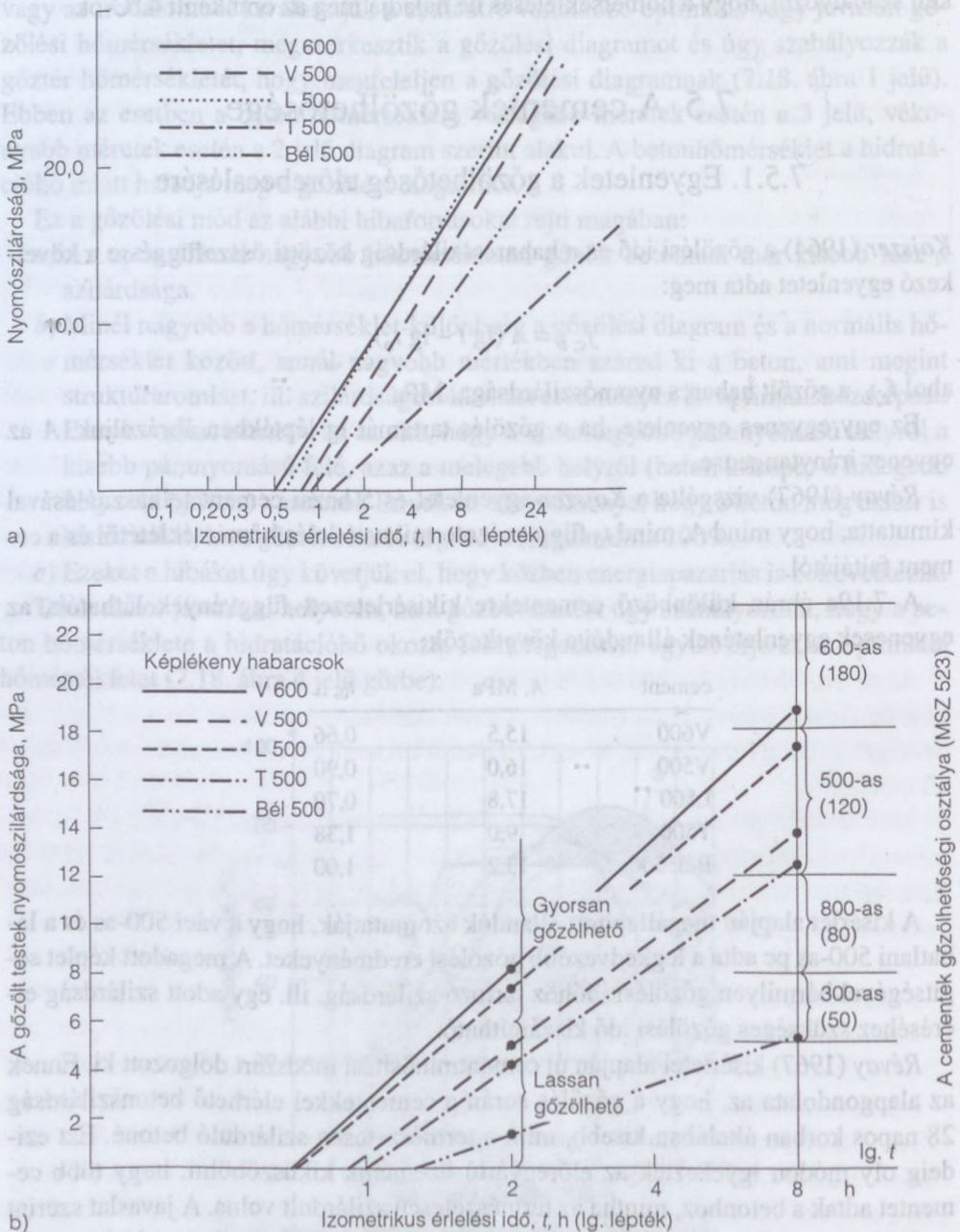
A 7.19a ábrán különböző cementekre kikísérletezett függvények láthatók, az egyenesek egyenletének állandói a következők:

cement	A , MPa	t_0 , h
V600	15,5	0,66
V500	16,0	0,90
L500	17,8	0,70
T500	9,0	1,38
Bél. 500	13,2	1,00

A kísérlet alapján megállapított állandók azt mutatják, hogy a váci 500-as és a lábatlani 500-as pc adta a legkedvezőbb gőzölési eredményeket. A megadott képlet segítségével bármilyen gőzölési időhöz tartozó szilárdság, ill. egy adott szilárdság eléréséhez szükséges gőzölési idő kiszámítható.

Révy (1967) kísérletei alapján új cementminősítési módszert dolgozott ki. Ennek az alap gondolata az, hogy a gőzölés során a cementekkel elérhető betonszilárdság 28 napos korban általában kisebb, mint a természetesen szilárduló betoné. Ezt ezi-deig oly módon igyekeztek az előregyártó üzemek kiküszöbölni, hogy több cementet adtak a betonhoz, mintha az természetesen szilárdult volna. A javaslat szerint a gőzölt cementekre más jelölést kell adni és a gőzölt cementeknek a szabványos, ill. a később bevezetendő szabványos vizsgálat alapján a gőzölési időt is figyelembe véve megállapított 28 napos szilárdságot alapul véve kell a cementeket minősíteni, ill.

megjelölni. Az értékhatárokat a 7.19b ábra szemlélteti. A kísérlet során az RSZ 138-62 szerinti képlékeny habarcsokat vizsgálták (megfelel az MSZ 523-72 szerinti habarcsoknak), az izotermikus érlelés 70 °C-on 2–8 órán át tartott.



7.19. ábra. Cementek gőzölhetősege [Révay-Nagyiné (1966)]

a) a gőzölési idő hatása a nyomószilárdságra; b) a cementek gőzölhetősegi minőségének értékhatárai

Révay és Nagyné (1966) összefüggést állított fel a várható betonszilárdságra a habarcsszilárdság függvényében:

$$f_{c, \text{cube}, 2} = 1,33 f_{h2} + 1,3;$$

$$f_{c, \text{cube}, 28} = \frac{1,33 f_{h6} + 790}{0,33(f_{h6} - f_{h2}) + b},$$

ahol $f_{c, \text{cube}, 2}$ a 2 órás izotermikus érleléssel elérhető betonszilárdság, MPa;
 $f_{c, \text{cube}, 28}$ a gőzölt beton 28 napos szilárdsága, MPa;
 f_{h2} ill. f_{h6} a 2, ill. 6 órás izotermikus érleléssel elérhető habarcsszilárdság, MPa (MSZ 523 szerinti szabványos habarcs);
 b az érleléstől függő tényező.

Révay kísérletei biztatóak abból a szempontból, hogy a jövőben a gőzölésre használt cementeket a gőzölés szempontjából minősíteni lehet. A kísérletek azonban további alátámasztást kívánnak. Mind ez ideig ilyen szabványt nem készítettek.

7.5.2. A cementfajta hatása a gőzölés hatásfokára

A 7.4. táblázat – különböző szerzők szerint – tartalmazza a tiszta portlandcementek gőzölhetőség szempontjából kedvező összetételét. A következőkben arra mutatunk be példákat, hogy hogyan függ a gőzölés hatásfoka a cementtől és a gőzölési diagramtól. A változók nagy száma miatt a szilárdságot 7,07 cm élhosszúságú betonkockákon, a cementkő mikroszerkezetét 3 cm élhosszú pépkockákon vizsgáltuk. A beton hőmérséklete azonosnak vehető a gőzölési diagrammal.

7.4. táblázat. Jól gőzölhető cement ásványi összetétele különböző szerzők szerint

Szerző	Javasolt				Örlési finomság
	C ₃	C ₂ S	C ₃ A	C ₃ S/βC ₂ S	
	tartalom, m%				
Keil és Narjes	60	10–12	≤12		
Reinsdorf	50–65	20–22	<10, ha >10 többlet gipsz kell	>3	Finom örlés
Kajszer	60		6–8		
Kilián és Székely	70	10	10		Finom örlés
Révay	50–60	25–10	8–10		
Budnikov és Erschler	45		ő10		
Malinowski	60	8–10	ő8		
Butt és munkatársai	40–45		<10		

7.5. táblázat. A cementek ásványi összetétele és jellemzői

Cement jelle	L500	A	V-0	V-20	V-40	TB	TC	B	D	S54
C ₃ S, m%	nem számítható (10–15 m% pernye)	54,4	68,3	nem számítható (20 m% kohósalak)	nem számítható (40 m% kohósalak)	37,6	33,4	21,1	53,5	60,2
βC ₂ S, m%		17,2	5,8			25,3	29,6	43,6	13,5	10,1
C ₃ A, m%		6,6	11,5			19,2	16,5	18,2	17,1	0,7
C ₄ AF, m%		16,5	9,0			7,3	9,6	10,7	9,6	21,7
Cs, m%	4,5	3,5	4,0	4,0	4,0	8,2	7,2	3,5	4,4	4,6
szabad C		0,5				1,5	1,5	1,62	0,84	1,10
Fajlagos felület, m ² /kg	268,0	286,9	297,8	396,9	299,0	398,0	322,0	226,0	335,0	245,0
Kötésvíz, m%	29,0	25,5	30,5	29,0	30,5	37,0	28,0	30,5	33,0	23,0
TT	0,71	0,90	0,97	0,77	0,57	0,84	0,82	0,76	0,92	0,94
Kockaszilárdság, MPa										
2 napos	32,0	31,5	34,0	38,8	34,3			25,6	33,8	
7 napos	43,6	53,5	53,9	54,4	48,1			36,9	46,1	
28 napos	55,9	63,9	64,5	63,0	58,5			48,7	53,3	
Hűzőszilárdság, MPa										
2 napos	2,44	2,91	2,93	2,74	2,62			2,36	2,99	
7 napos	2,78	3,43	3,44	3,34	2,91			2,40	3,08	
28 napos	3,22	3,85	3,69	3,53	3,98			3,02	3,12	
S03 m%: Jirku szerint										
számított	2,90	1,29	2,33	2,33	2,33	5,20	3,60	2,80	3,90	0,12
Tényleges	2,65	2,06	2,35	2,35	2,35	4,85	4,26	2,06	2,59	2,71

7.10. példa. 10 féle cementtel kísérleteztünk (7.5. táblázat). Ezek közül az L500 és az S54 jelű szabványos gyári cement volt. Az A jelű cement a SZIKKTI által előállított, jól gőzölhető cementtípus volt. A V jelűeket váci klinkerből készítettük. A T, B és D jelűek a SZIKKTI kísérleti üzemében előállított cementek voltak. A T jelű cementet 4 féle őrlési finomságúra készítettük és változtattuk a gipszkő-tartalmát. A cementeknek megvizsgáltuk a szemmegoszlását és elkészítettük röntgendiffraktogramjait.

A beton cementtartalma mindig 400 kg/m^3 , az adalékanyag osztályozott dunai eredetű homokos kavics, finomsági modulusa kb. 6, a betonkonzisztencia gyengén képlékeny volt. A 3 cm élhosszú pépkockákat kötészvízzel készítettük.

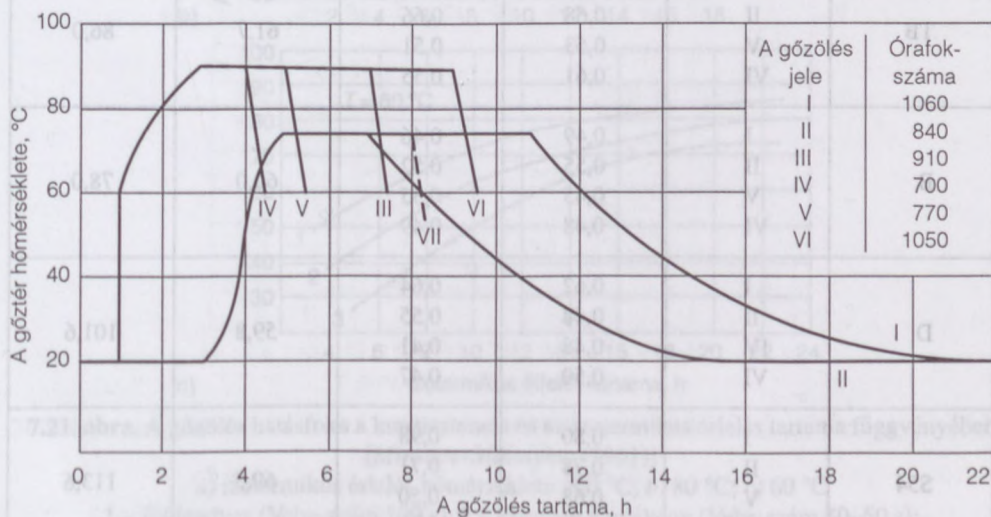
A gőzölés körülményei:

a) 3 órás pihentetés, $25 \text{ }^\circ\text{C/h}$ felfűtési sebesség, 2, ill. 6 órás gőzölés $75 \text{ }^\circ\text{C}$ -on, lassú lehűtés.

b) Olyan körülményeket biztosítva, hogy a gőzölés közbeni destrukció lehetőleg nagy legyen (pihentetés nélküli gyors felfűtés, $90 \text{ }^\circ\text{C}$ -on 6 órás, ill. 2 órás gőzölés, gyors lehűtés). A gőzölési diagramok a 7.20. ábrán láthatók, a gőzölés hatásfokát a 7.6. táblázat tartalmazza.

Ez a kutatás egyértelműen azt mutatja, hogy a gőzölés hatásfoka akkor volt a legnagyobb, amikor a cement nagy C_3S - és mérsékelt vagy kis C_3A -tartalmú volt (V-0 és S54 jelűek). 20, ill. 40 m% kohósalak-tartalom esetén (V20, ill. V40 jelűek) csak rövid, ill. kisebb hőmérsékletű gőzölés esetén csökkent a gőzölés hatásfoka. Ugyanakkor a gőzölés hatásfoka a nagy $\beta\text{C}_2\text{S}$ -tartalmú B jelű cement esetében volt a legkisebb.

E kísérlet során megvizsgáltuk a gipszkő túladagolásának a hatását is. Nevezetesen a TC jelű cementet elkészítettük a *Jirku* szerinti $[\text{SO}_3 \text{ (m\%)} = 6,8 \cdot 10^{-5} \cdot \text{C}_3\text{A} \text{ (m\%)} A_c \text{ (cm}^2\text{/g)}]$ egyensúlyi gipsztartalomhoz képest megnövelt gipszkőadagolással. E kísérlet szerint gőzölés esetén a megnövelt gipsztartalomnak a *Jirku* szerinti



7.20. ábra. Gőzölési diagramok

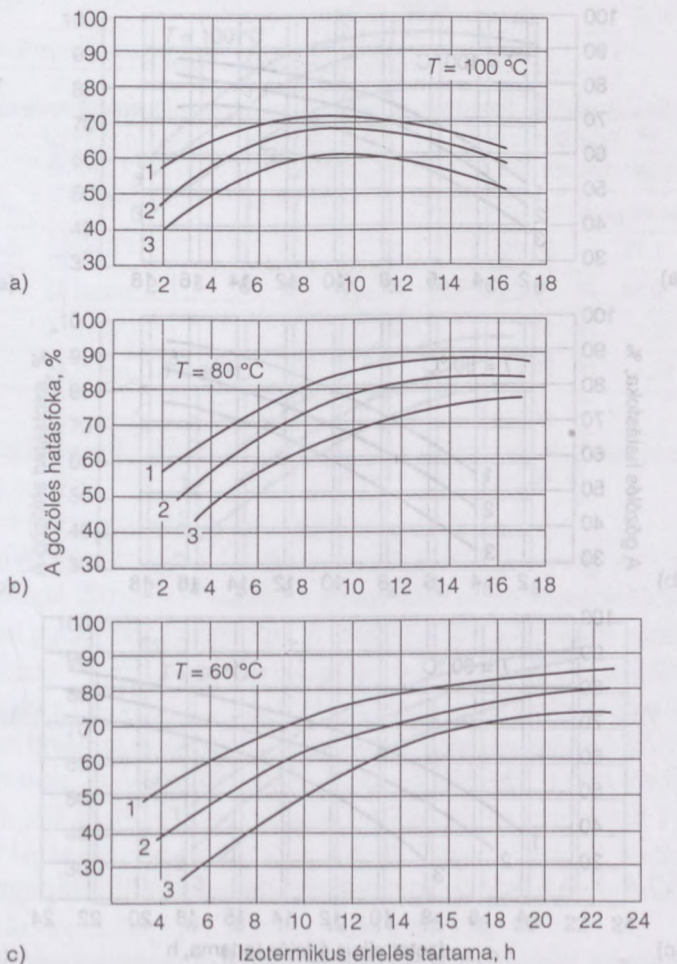
7.6. táblázat. A gőzölés hatásfoka

Cement jele	Gőzölési diagram jele	Beton	Pép	A gőzöletlen	
		gőzölésének a hatásfoka		beton	pép
		24 órás korban		28 napos szilárdsága, MPa	
L500	I	0,74 és 0,78	0,61 és 0,68	58,5	112,5
	II	0,74 és 0,74	0,64 és 0,64		
	III	0,74 és 0,78	0,63 és 0,58		
	IV	0,56	0,44		
	V	0,51	0,41		
A	I	0,66	0,66	80,0	127,0
	II	0,57 és 0,57	0,47 és 0,50		
	V	0,42	0,41		
	VI	0,68	0,46		
V-0	I	0,81	0,70	67,7	103,0
	VI	0,78	0,53		
	VII	0,79	0,60		
V-20	I	0,63	0,61	75,7	115,8
	II	0,64	0,61		
	V	0,63	0,58		
	VI	0,64	0,64		
V-40	I	0,67	0,75	67,5	100,2
	II	0,63	0,59		
	V	0,47	0,56		
	VI	0,63	0,58		
TB	I	0,63	0,67	61,7	86,0
	II	0,68	0,66		
	V	0,53	0,51		
	VI	0,61	0,55		
B	I	0,49	0,46	60,0	78,0
	II	0,55	0,52		
	V	0,45	0,35		
	VI	0,48	0,49		
D	I	0,62	0,64	59,8	101,6
	II	0,48	0,55		
	IV	0,48	0,41		
	VI	0,50	0,47		
S54	I	0,80	0,98	69,3	113,6
	II	0,78	0,71		
	V	0,68	0,50		
	VI	0,69	0,73		

optimálisához képest kb. 2 m%-os (SO_3 -ban kifejezve kb. 1 m%-os) növelésével érték el a legnagyobb húzó- és nyomószilárdságot minden őrlésfinomságú cementtel. E kísérlet szerint *gőzölés esetén a megnövelt gipsztartalom előnyös*. Ebben a kísérletben azonban csak a nyomószilárdságot vizsgáltuk.

Más kísérleteink eredményei szerint a gipszkőtartalomnak a *Jirku* szerinti optimálisához képest kb. 2 m%-os (SO_3 -ban kifejezve kb. 1 m%-os) növelésével érték el a legnagyobb húzó- és nyomószilárdságot minden őrlésfinomságú cementtel.

A gőzölés hatásfokára vonatkozó kísérleti eredményeink egybevágóak *Malinowsky* (1963) kísérleti eredményeivel és azokkal, amelyeket később az S100 jelű cement kikísérletezése során a SZIKKTI-ben elérték [*Révy* (1967)].



7.21. ábra. A gőzölés hatásfoka a konzisztencia és az izotermikus érlelés tartama függvényében [*Mironov-Malinyina* (1961)]

a) izotermikus érlelés hőmérséklete 100°C ; b) 80°C ; c) 60°C

1 – földnedves (Vebe-szám 100 s); 2 – gyengén képlékeny (Vebe-szám 30–60 s);
3 – képlékeny (kúproskadás 30 mm). A cement tiszta portlandcement

7.5.3. Optimális gőzölési hőmérséklet

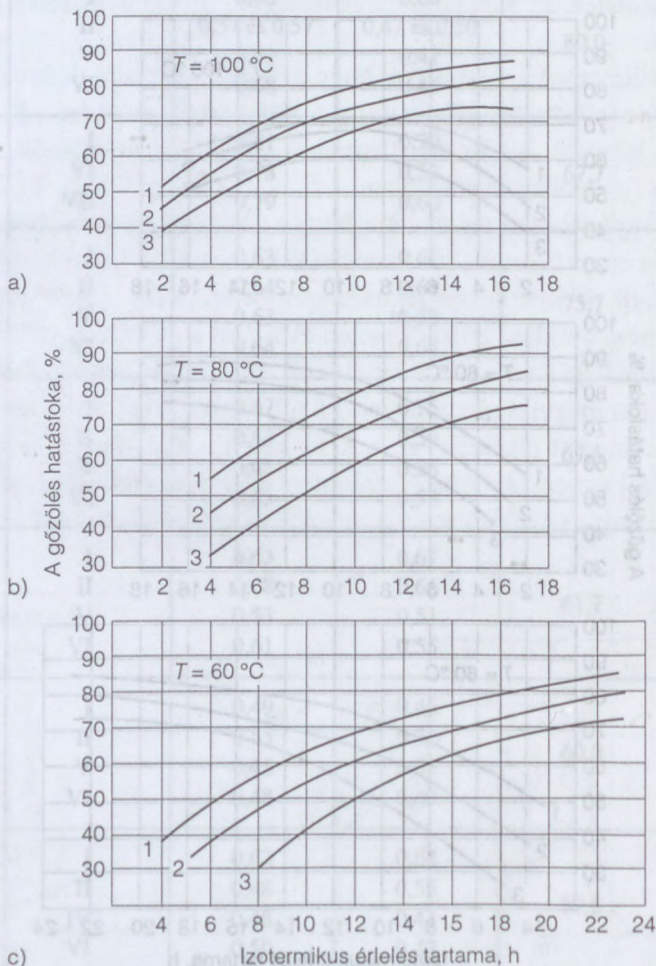
Révay is rámutatott arra, hogy *nem szabad általában optimális gőzölési hőmérsékletről beszélni*, hanem csak bizonyos körülmények között. Így megkülönböztetünk optimumot

– a hajlító-húzó-, ill. a nyomószilárdság,

– a rövid, ill. a hosszú gőzölés alapján,

– a gőzölés utáni szilárdság, ill. a 28 napos szilárdság alapján.

Mironov és Malinyina (1961) szerint az *optimum annál nagyobb, minél közelebb van a betonkonzisztencia a földnedveshez*. Továbbá az izotermikus érlelés tartamá-



7.22. ábra. A gőzölés határfoka a konzisztencia és az izotermikus érlelés tartama függvényében

[Mironov–Malinyina (1961)]

a) izotermikus érlelés hőmérséklete 100 °C; b) 80 °C; c) 60 °C

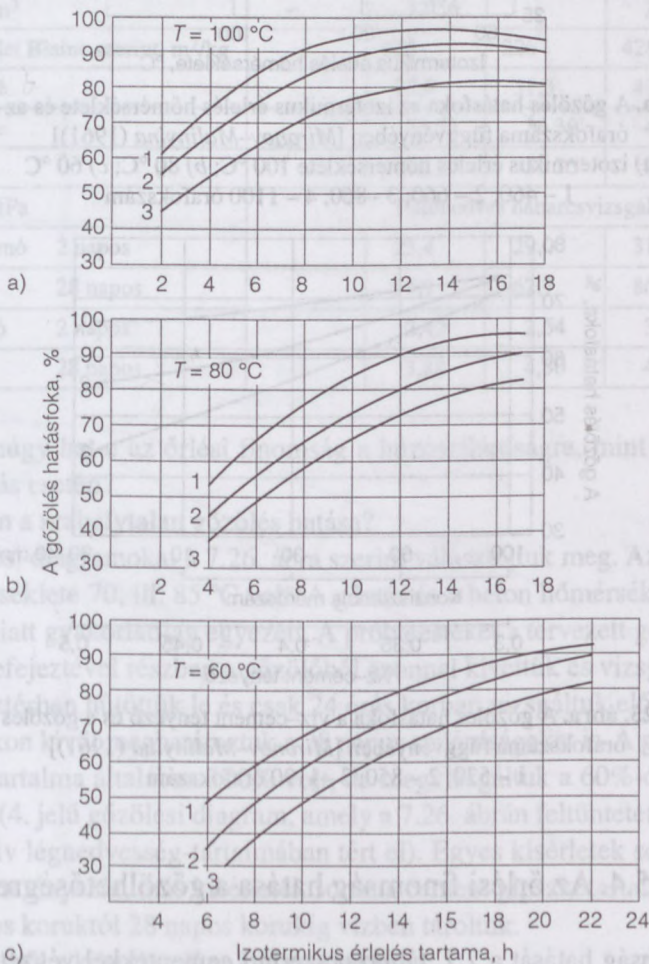
1 – földnedves (Vebe-szám 100 s); 2 – gyengén képlékeny (Vebe-szám 30–60 s);

3 – képlékeny (kúproskadás 30 mm). A cement kohósalak-portlandcement

val és ezzel együtt az órafokszámmal nem nő arányosan a gőzölés hatásfoka, hanem a növekmény függ a cement fajtájától és a gőzölés hőmérsékletétől (7.21–7.23. ábra). Minél nagyobb az izotermikus érlelés hőmérséklete, annál gyorsabban el lehet érni a maximális szilárdságot. Tiszta portlandcement esetén a 100 °C-os izotermikus érlelés káros. A hosszan tartó, ill. a nagyobb hőmérsékletű izotermikus érlelésnek heterogén portlandcementek esetében van értelme.

Azt, hogy az órafokszám szerinti gőzölést nem lehet függetleníteni az izotermikus érlelés hőmérsékletétől, azt jól szemlélteti a 7.24. ábra.

Ha a víz–cement tényező nő, akkor a nagyobb órafokszámú érlelés növeli a szilárdságot (7.25. ábra) [Mironov és Malinyina (1961)].

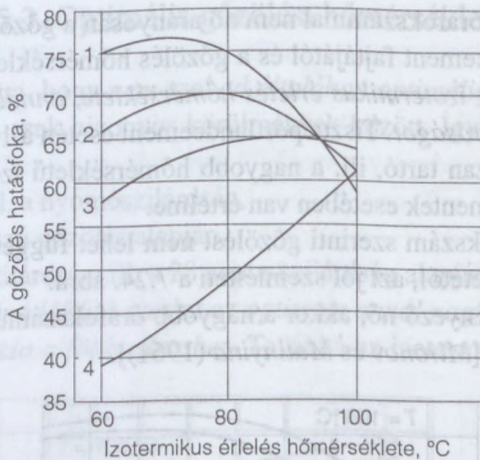


7.23. ábra. A gőzölés hatásfoka a konzisztencia és az izotermikus érlelés tartama függvényében [Mironov–Malinyina (1961)]

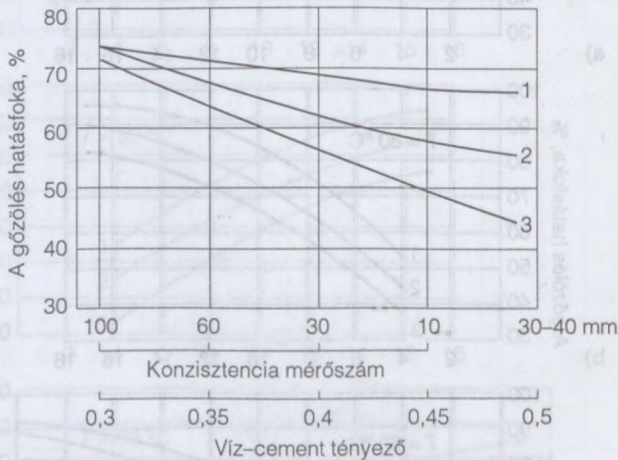
a) izotermikus érlelés hőmérséklete 100 °C; b) 80 °C; c) 60 °C

1 – földnedves (Vebe-szám 100 s); 2 – gyengén képlékeny (Vebe-szám 30–60 s);

3 – képlékeny (kúproskadás 30 mm). A cement kohósalak-portlandcement



7.24. ábra. A gőzölés hatásfoka az izotermikus érlelés hőmérséklete és az érlelés órafokszáma függvényében [Mironov-Malinyina (1961)]
 a) izotermikus érlelés hőmérséklete 100 °C; b) 80 °C; c) 60 °C
 1 – 460; 2 – 660; 3 – 860; 4 – 1100 órafokszám



7.25. ábra. A gőzölés hatásfoka a víz-cement tényező és a gőzölés órafokszáma függvényében [Mironov-Malinyina (1961)]
 1 – 520; 2 – 850; 3 – 1190 órafokszám

7.5.4. Az őrlési finomság hatása a gőzölhetőségre

Az őrlési finomság hatását a 7.7. táblázat szerinti cementekkel végzett kísérleteink alapján ismertetjük.

Ezeket a kísérleteket több céllal végeztük:

- a) Összegeződik-e a gőzölésnek és az őrlési finomságnak a kezdeti szilárdulásra gyakorolt hatása?

7.7. táblázat. A kísérlethez használt cementek tulajdonságai

Tulajdonság	Klinkerben	A cement jele			
		I	II	III	IV
C_3S , m%	50,3	48,5	47,8	47,0	45,4
βC_2S , m%	26,8	25,9	25,5	25,0	24,2
C_3A , m%	12,1	11,7	11,5	11,3	10,9
C_4AF , m%	8,7	8,4	8,5	8,1	7,8
MgO, m%	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
$CaSO_4$, m%	0,7	3,8	5,4	7,0	10,1
Sűrűség, g/cm ³	–	3,056	–	2,961	2,917
Fajlagos felület Blaine szerint, m ² /kg		225	226	428	625
Kötésvíz, m%		28,6	31,3	41,0	38,0
Kötés kezdete		2 ó 55'	3 ó 30'	4 ó 10'	2 ó 45'
Kötés vége		4 ó 20'	5 ó 35'	5 ó 35'	4 ó 05'
Szilárdság, MPa		Földnedves habarcsvizsgálattal			
nyomó	2 napos	25,4	29,0	31,1	58,5
	28 napos	54,9	62,7	86,0	86,3
húzó	2 napos	2,42	2,54	3,15	3,98
	28 napos	3,88	4,30	4,22	5,41

b) Ugyanúgy hat-e az őrlési finomság a húzószilárdságra, mint természetes szilárdulás esetén?

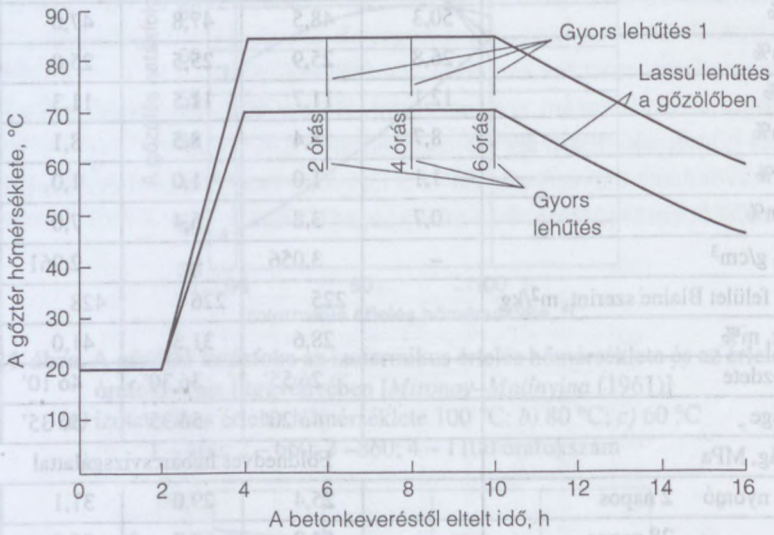
c) Milyen a szabálytalan gőzölés hatása?

A gőzölési diagramokat a 7.26. ábra szerint választottuk meg. Az izotermikus érlelés hőmérséklete 70, ill. 85 °C volt. A gőztér és a beton hőmérséklete a kis próbatestméret miatt gyakorlatilag egyezett. A próbatesteket a tervezett gőzölési idő (2, 4, ill. 6 óra) befejeztével részben a gőzölőből azonnal kivettük és vizsgáltuk, részben a betont a gőztérben hűtöttük le és csak 24 óras korban vizsgáltuk először. Az 1 napos szilárdságokon kívül meghatároztuk a 28 napos szilárdságokat is. A gőztér relatív légnedvesség-tartalma általában 100% volt, de megvizsgáltuk a 60%-os légnedvesség-tartalmat is (4. jelű gőzölési diagram, amely a 7.26. ábrán feltüntetett I jelűtől csak a gőztér relatív légnedvesség-tartalmában tért el). Egyes kísérletek során változtattuk a víz–cement tényezőt, más kísérletek során a cement gipszkötőanyag-tartalmát. A próbatesteket 1 napos koruktól 28 napos korukig vízben tároltuk.

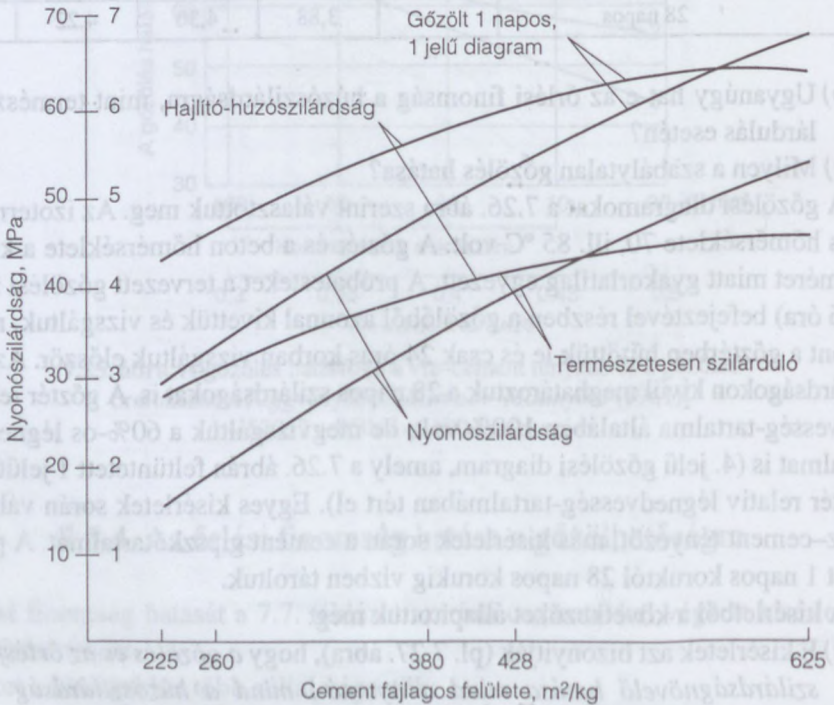
A kísérletből a következőket állapítottuk meg:

a) E kísérletek azt bizonyítják (pl. 7.27. ábra), hogy a gőzölés és az őrlésfinomság szilárdságnövelő hatása mind a nyomó-, mind a húzószilárdság esetében összegeződött. Továbbá míg a nyomószilárdság az őrlési finomsággal közel lineárisan nőtt, a hajlító-húzószilárdság növekménye a nagy őrlési finomságok

tartományában relative kisebb volt, mint a nyomószilárdságé. Tehát a gőzölés nem változtatta meg a szilárdságoknak az őrlési finomságtól való, természetes szilárdulás során megismert függését.



7.26. ábra. Gőzölési diagramok

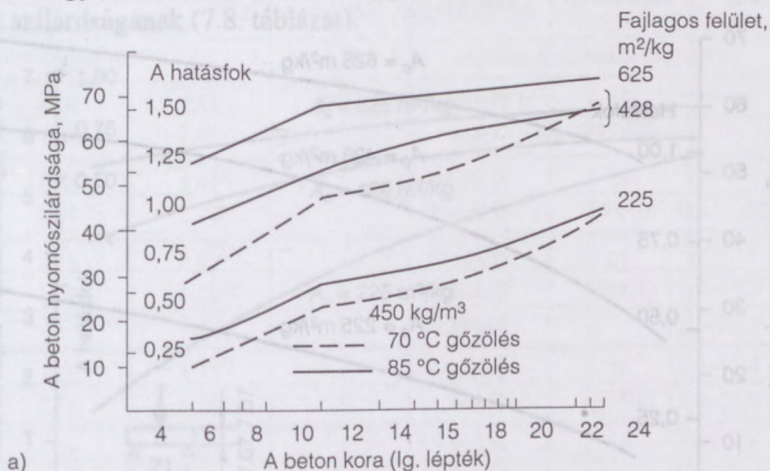


7.27. ábra. Gőzölt és természetesen szilárduló betonok 1 napos szilárdsága a fajlagos felület függvényében; cementtartalom 450 kg/m³; konzisztencia gyengén képlékeny

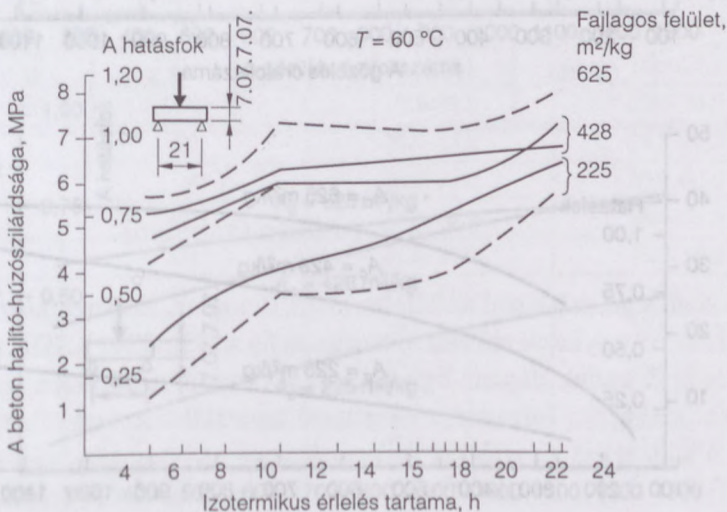
A betongőzölés hatásfokát a természetesen szilárduló beton 28 napos szilárdságához viszonyított szilárdságokkal szokás jellemezni. A 7.28. ábra szerinti értékelés során viszonyítási alapnak a természetesen szilárduló, mindvégig vízben tárolt, 225 m²/kg fajlagos felületű cementtel készített betonok 28 napos nyomó-, ill. hajlító-húzószilárdságát tekintettük, amely 450 kg/m³ cementtartalom esetén 53, ill. 7 MPa, 300 kg/m³ cementtartalom esetén 34,7, ill. 5,8 MPa volt.

A gőzölés így megválasztott hatásfoka a 625 m²/kg fajlagos felületű cementek kivételével általában nagyobb volt 85 °C-os, mint 70 °C-os gőzöléssel. Ez összhangban van a cement ásványi összetételével (7.7. táblázat).

Továbbá az így értelmezett hatásfok szerint a durvára őrlött cement gőzölési hatásfoka nagyon kicsi volt. Oka az, hogy sem az ásványi összetétel, sem a faj-



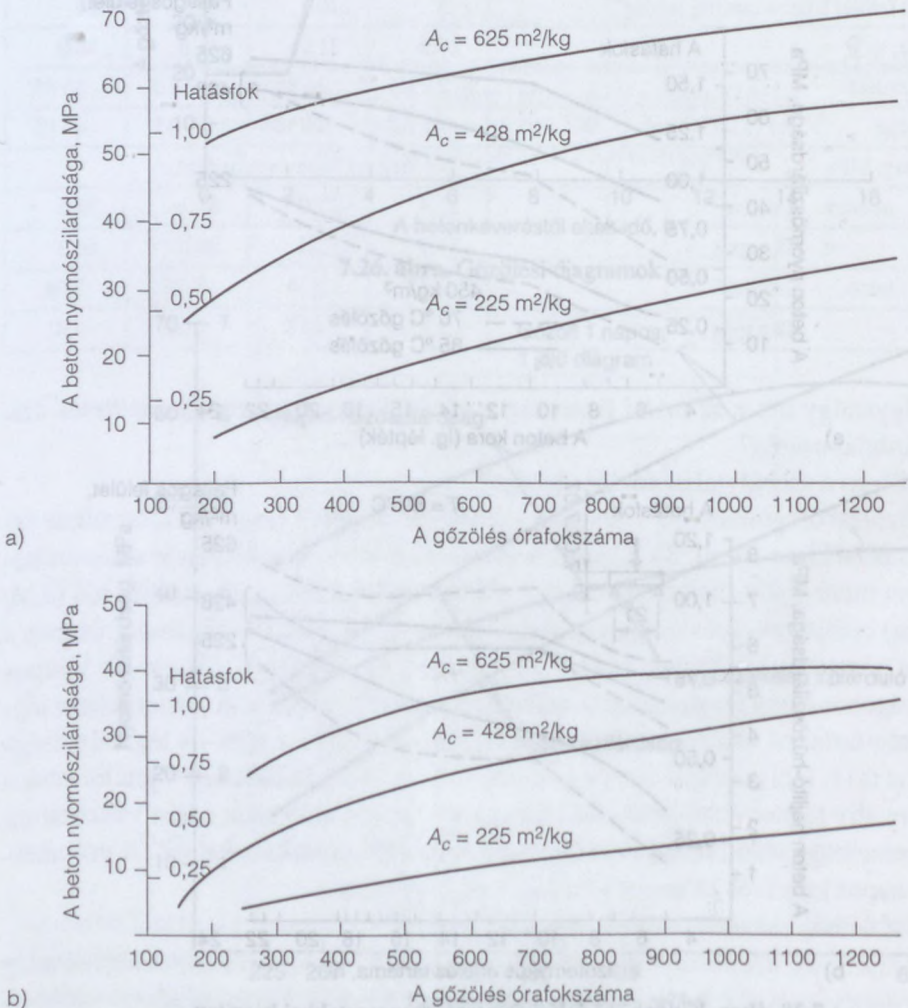
a)



b)

7.28. ábra. Különböző őrlési finomságú cementekkel készített gőzölt betonok szilárdsága koruk függvényében
a) nyomószilárdság; b) hajlító-húzószilárdság; cementtartalom 450 kg/m³

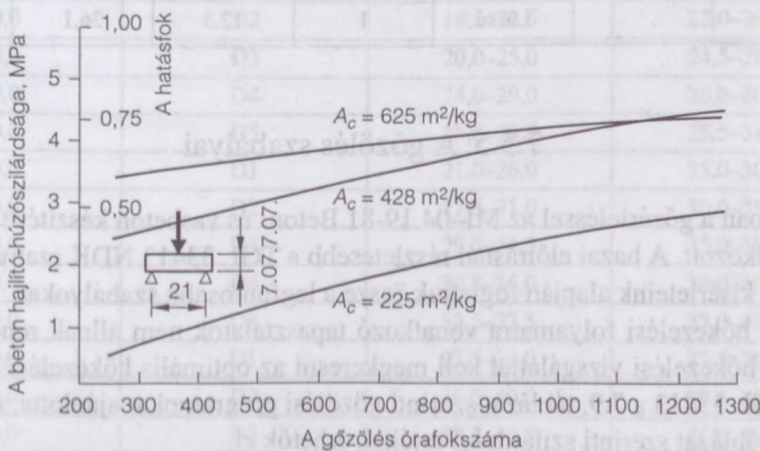
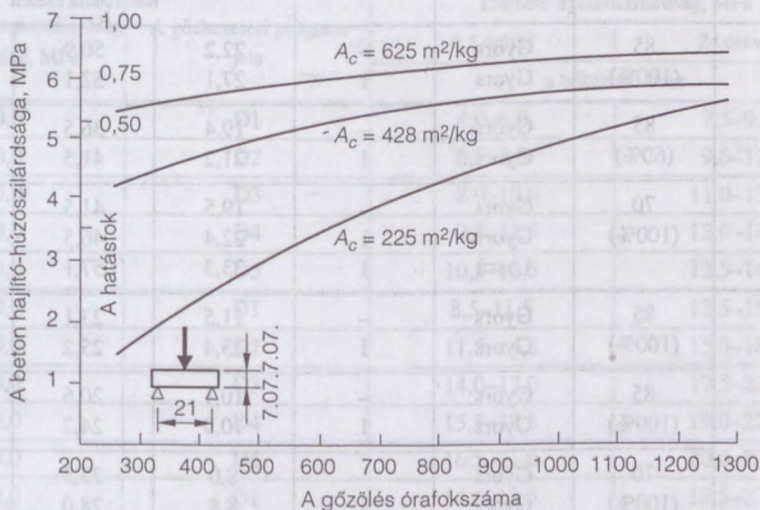
lagos felület nem volt kedvező a gőzöléses szilárdításhoz. Azonban már 428 m²/kg fajlagos felület esetén annyira megnőtt a hatásfok 1 napos korra, hogy egyértelműen megállapítható, nyomószilárdság szempontjából csak közepes finomságúra (350 m²/kg) vagy annál valamivel finomabbra őrlött cementeket érdemes gőzölni, mivel a finomabbra őrlött cementekkel nagyobb gőzölési hatásfokot lehet elérni, mint a durvára őrltekkel. Ez esetben különösen nagyobb (450 kg/m³) cementtartalom esetén már nagyon rövid idejű gőzöléssel a sablonból kiszerezhető, tárolótérbe szállítható elemeket lehet előállítani. Azt, hogy az őrlési finomság növelésével a nyomószilárdságot növelni lehet, jól szemlélteti a 7.29. ábra, amelyen a nyomószilárdság az órafokszám függvényében látható.



7.29. ábra. A gőzölt beton nyomószilárdsága az órafokszám függvényében
 a) 450 kg/m³; b) 300 kg/m³ cementtartalom

A 7.30. ábrán a hajlító-húzószilárdság a gőzölés órafokszáma függvényében látható, eszerint húzószilárdság szempontjából a fajlagos felületet csak kb. 400 m²/kg-ig érdemes növelni (az ásványi összetételtől függően), továbbá a hosszantartó gőzölés csak durvára őrlött cementek esetében célszerű, végül az órafokszám növelésével a különböző őrlési finomságú cementekkel készített betonok húzószilárdsága jobban közelít egymáshoz, mint a nyomószilárdsága.

c) A kísérletek értékelése során a gőzölt beton szilárdsága általában a 24 órás szilárdságot értjük. A gőzölt beton kizsaluzhatósága szempontjából azonban az a szilárdság a döntő, amelyet a beton a kizsaluzás idejére elér. Kísérleteink szerint 6 órán át gőzölt betonoknak a gőzölés befejeztével megvizsgált szilárdsága 85–95%-a volt az ugyancsak 6 órán át gőzölt, de csak 24 órás korban vizsgált betonok szilárdságának (7.8. táblázat).



7.30. ábra. A gőzölt beton hajlító-húzószilárdsága az órafokszám függvényében
a) 450 kg/m³; b) 300 kg/m³ cementtartalom

d) Ha a gőztér relatív légnedvességtartalma 100% helyett csak 60% volt, akkor a gőzölés utáni szilárdság kisebb lett, és a hajlító-húzószilárdság csökkenése nagyobb mérvű volt, mint a nyomószilárdságé, továbbá nagyobb volt a durva őrlésű cementé, mint a finom őrlésűé (7.8. táblázat). Ebben az esetben nagyobb hatása mutatkozott az 1 órás vizes utókezelésnek, mint 100% relatív légnedvességű térben gőzölés esetén.

7.8. táblázat. A vizsgálat időpontjának hatása a beton nyomószilárdságára (az izotermikus érlelés tartama 6 óra)

Cement-tartalom, kg/m ³	Gőzölési hőmérséklet, °C	Lehűtés	Beton kora, d	A beton szilárdsága, MPa		
				225	428	625
				m ² /kg fajlagos felülető cement használata esetén		
450	85 (100%)	Gyors	–	22,2	50,9	62,5
		Gyors	1	27,1	52,1	66,1
	85 (60%)	Gyors	–	19,4	36,5	59,5
		Gyors	1	21,2	41,5	46,4
	70 (100%)	Gyors	–	19,5	41,5	63,5
		Gyors	1	22,4	46,5	67,0
Lassú	1	33,3	57,1	72,1		
300	85 (100%)	Gyors	–	11,5	23,1	37,7
		Gyors	1	13,4	25,2	41,7
	85 (100%)	Gyors	–	10,1	20,6	29,1
		Gyors	1	10,9	24,2	31,7
	70 (100%)	Gyors	–	8,0	25,5	23,4
		Gyors	1	8,8	28,0	29,1
Lassú	1	12,3	36,1	38,6		

7.5.5. A gőzölés szabályai

Hazánkban a gőzérleléssel az MI-04.19-81 Beton- és vasbeton készítése 21. fejezete foglalkozott. A hazai előírásnál részletesebb a TGL 33413 NDK szabvány. E kétből és kísérleteink alapján foglaljuk össze a legfontosabb szabályokat.

Ha a hőkezelési folyamatra vonatkozó tapasztalatok nem állnak rendelkezésre, akkor a hőkezelési vizsgálattal kell megkeresni az optimális hőkezelési programot.

A TGL 33413 a 7.9. táblázat szerinti gőzölési programokat ajánlotta, amelyekkel a 7.10. táblázat szerinti szilárdsági értékek érhetők el.

Kiindulási feltételek:

– cementminőség PZ 375–PZ 450 (tisztá pc),

7.9. táblázat. TGL 33413 által ajánlott gőzölési programok [Wärmebehandlung..... (1978)]

Gőzölési program jele	A gőzölendő építőelem átlagos vastagsága, mm	Pihentetés	Felfűtés	Izotermikus érlelés	Lehűlés	Összesen
D1	50-ig	0,5	2	2	0,5	5
D2	51–250-ig	1	2	3,5	0,5	7
D3	251–500-ig	1	3	4	1	9
D4	500–750-ig	2	3	5	1	11
D5	750–1000-ig	2	3	6	2	13

7.10. táblázat. Várható nyomószilárdságok a tervezett betonszilárdság és a gőzölési program függvényében

Az $f_{cm, cube}$ nyomószilárdság középértéke, MPa	A gőzkezelési program jele	Elérhető nyomószilárdság, MPa	
		0,5 órával	24 órával
		a hőkezelés után	
20,0	D1	4,0–6,0	7,5–9,5
20,0	D2	6,5–8,5	9,5–12,5
20,0	D3	8,0–10,0	11,0–13,0
20,0	D4	9,5–11,5	12,0–14,0
20,0	D5	10,5–12,5	12,5–14,5
30,0	D1	8,5–11,5	12,5–15,5
30,0	D2	11,5–14,5	15,0–18,0
30,0	D3	14,0–17,0	17,5–21,0
30,0	D4	15,5–18,5	19,0–22,0
30,0	D5	16,5–21,0	20,0–23,0
40,0	D1	14,5–18,5	18,5–22,5
40,0	D2	18,5–22,5	22,0–26,0
40,0	D3	20,0–25,0	24,5–28,5
40,0	D4	24,0–29,0	26,0–30,0
40,0	D5	25,0–29,5	28,5–31,5
50,0	D1	21,0–26,0	25,0–30,0
50,0	D2	27,5–31,0	30,0–35,0
50,0	D3	29,5–34,5	35,0–38,0
50,0	D4	32,0–36,0	36,0–40,5
50,0	D5	33,5–37,5	37,0–42,0
60,0	D1	27,5–35,0	33,5–39,5
60,0	D2	36,0–40,0	39,5–45,5
60,0	D3	38,5–43,5	45,0–48,5
60,0	D4	41,5–47,5	46,0–51,0
60,0	D5	43,0–49,0	46,5–52,5

- konzisztencia képlékenytől földnedvesig,
- érlelési betonhőmérséklet, max. 80–85 °C,
- kiformázáskor a léghőmérséklet legalább 10 °C.

Ha valamely gőzölési programmal a 7.10. táblázatban megadottnál nagyobb nyomószilárdságot követelünk meg, akkor ezt megfelelő betontechnológiai intézkedésekkel (pl. kisebb víz–cement tényező, nagyobb tömörség, folyósító használata kezdőszilárdság-növelő adalékszerek adagolása, a friss betonkeverék hőmérsékletének a növelése melegbetonnal) vagy jobb minőségű beton tervezésével vagy az érlelési program módosításával lehet elérni.

Fagyálló, vízzáró betonok gőzölése esetén a felfűtési időtartamot 2,5–5,0 órára kell növelni. Ha az elemeket kiszaluzott állapotban gőzöljük, akkor a felfűtési időt a 7.9. táblázatban megadotthoz képest 1 órával növelni kell.

A folyós beton felfűtési idejét a 7.9. táblázatban megadotthoz képest 20–30%-kal növelni, földnedves betonokét 15–20%-kal csökkenteni kell. Célszerű a kétlépcsős felfűtés, az első felében az átlagnál kisebb, a második felében annál nagyobb felfűtési sebességgel. 100 fagyási–felengedési ciklusra fagyálló betonnak a pihentetési és a felfűtési ideje együtt legalább 5 óra legyen.

Meg lehet szüntetni a gőzbevezetést a gőztérbe a felfűtési időszak befejezése előtt, ha a gőztér lehűlése ≤ 5 °C/h.

Rúd alakú előre gyártott elemek, 200 mm-nél vastagabb elemek, valamint kiszaluzott állapotban gőzölt elemek lehűtési sebessége legfeljebb 40 °C/h, f100 fagyállósági követelményre, vz8 vízzárósági követelményre tervezett betonok max. lehűtési sebessége 20 °C/h lehet.

Az optimális és megengedett legnagyobb érlelési hőmérsékletet – ez betonhőmérsékletet jelent – a 7.11. táblázat szerint vehetjük fel.

7.11. táblázat. A gőzölés optimális és megengedett legnagyobb hőmérsékletei húzó- és nyomószilárdságra [Balázs–Arany–Ostermann (1981)]

Jele	A cement	Optimális	Megengedett legnagyobb
	hidraulikus kiegészítő anyagtartalom, m%	hőmérséklet, °C	
450 Rpc 450 pc S54 350 pc S100 350 pc	0	70–80	90
350, ill. 450 kspc–20	20	80	90
350, ill. 450 ppc–10	10	80	90
350 kspc 40	0	80–90	95
Fehér pc		60	70

Lehülés közben az egyenlőtlen hőmérséklet-különbségekből keletkező repedések elkerülésére a beton és a környezet között nem szabad 60 °C-nál nagyobb hőmérséklet-különbséget megengedni. A károsodás megelőzése céljából – téli időben – célszerű közbülső tárolási hőmérsékletet beiktatni 15 °C-nál melegebb csarnokban. Ennek tartamát a 7.12. táblázat szerint, a közbülső értékeket interpoláció útján vehetjük fel.

A gőztér relatív légnedvesség-tartalma legalább 95% legyen.

7.12. táblázat Közbülső tárolási idő a tárolótér hőmérséklete és az elemvastagság függvényében

Átlagos külső léghőmérséklet, °C	Közbülső tárolási időtartam órában, ha a lemezvastagság, mm			
	50	100	200	300
+5	0,6	1,2	2,4	4,0
±0	1,0	1,8	3,6	5,0
-10	1,8	2,6	5,1	8,0
-20	2,2	3,8	7,6	12,0

Fontos a gőzölt beton nedves utókezelése, amely a lehűtés után legalább egyszeri gondos átítást vagy nagy páratartalmú térben tárolást jelent.

A gőzölt beton szilárdsága a következőképpen tételezhető fel:

A gőzölt betonnak a természetesen szilárduló betonéhoz viszonyított 28 napos nyomószilárdsága

– átlagos összetételű tiszta pc használata

– kedvező érlelési mód esetén 80–95%

– kedvezőtlen érlelési mód esetén 65–75%

– kedvező ásványi összetételű pc használata

– kedvező érlelési mód, optimális betonösszetétel

– nagy tömörség esetén 90–100%

– kohósalak pc használata

– kedvező érlelési mód esetén 90–100%

– kedvezőtlen érlelési mód esetén 80–90%

A gőzölt betonnak a természetesen szilárduló betonéhoz viszonyított 28 napos hajlító-húzószilárdsága

– kedvező érlelés és kedvező utókezelés esetén 80–95%

– kedvező érlelés, de nem megfelelő utókezelés esetén 70–85%

– kedvezőtlen érlelés és nem megfelelő utókezelés esetén 60–75%

A kedvező érlelés az előzőekben ismertetett gőzölési módot, és gondos nedves utókezelést jelent.

A kedvezőtlen érlelési mód rövid pihentetést, gyors felfűtést, az optimálistól eltérő érlelési hőmérsékletet, a gondos utókezelés hiányát, ezek egy részének vagy valamennyinek együttes hatását jelenti.

A betonösszetételt a várható szilárdságromlás figyelembevételével kell megtervezni.

7.6. A beton szilárdulása gőzölés után

A beton zavartalan szilárdulásához víz kell. Ez a megállapítás mind a gőzölt, mind a gőzöletlen betonra érvényes. A gőzölt betonból a lehűtés során nedvesség távozik el, akár lassú a lehűtés, akár gyors. Legfeljebb a gyors lehűtés során több az eltávozó nedvesség, mint lassú lehűtés során. Ugyancsak jobban kiszárad a vékony, mint a vastag elem.

A beton gőzölés utáni szilárdulása szempontjából két esetet különböztetünk meg:

- a tárolótéren az elemet fagy nem éri,
- a tárolótéren az elemet fagy is éri.

Továbbiakban ezt a két esetet ismertetjük kísérleteink kapcsán.

7.6.1. Milyen mértékű utókezelést igényel a gőzölt beton?

[Balázs (1964, 1967, 2001)]

Ha a betont a tárolótéren fagy nem éri, akkor a beton gőzölés utáni szilárdulása első-sorban attól függ, hogy mennyire pótoljuk a betonból a lehűtés során eltávozott vizet. Ezenkívül függ attól is, hogy milyen gyakori az esőzés, mennyi a levegő nedves-ségtartalma, hőmérséklete, milyen a légmozgás és a napsütés. Mindennek a véletlen jellegű gyakorlati esetnek a beton szilárdulására gyakorolt hatását kísérlettel eldön-

7.13. táblázat. A kutatómunka során felhasznált cementek kémiai és ásványi összetétele

Kötőanyag	Tatabányai 600-as	Lábatlani 500-as	Kohósalak
Jele	1	2	3
CaO (%)	64,45	64,62	45,17
SiO ₂ (%)	21,21	2,21	34,36
Al ₂ O ₃ (%)	4,66	6,36	5,81
Fe ₂ O ₃ (%)	3,53	3,14	2,39
MgO (%)	2,97	2,40	4,87
SO ₃ (%)	2,18	1,59	0,39
Izz. veszt. (%)	1,06	0,54	0,81
C ₃ S (%)	56,00	59,19	nem számolható
βC ₂ S (%)	19,16	14,44	
C ₃ A (%)	6,43	11,54	
C ₄ AF (%)	8,53	9,56	
CaSO ₄ (%)	3,74	–	
Telítési tényező	0,896	0,899	
Aluminát modulus	1,32	2,02	
Szilikát modulus	2,31	2,17	

teni nem lehet, és nehéz szabályt is adni. A kísérlettel csak a tendenciákra akartunk rámutatni. Azaz hogyan hat a beton gőzölés utáni szilárdulására a nedves utókezelés mértéke, ha a betont az utókezelés után szobalevegőn tároljuk.

Az **első kísérlet** során három kérdésre kívántunk választ kapni:

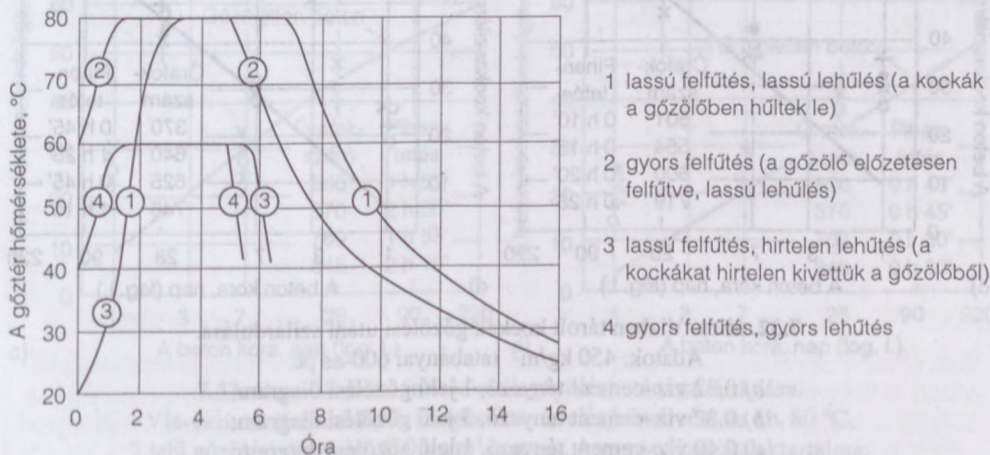
1. A gőzölés módja hogyan hat a gőzölés utáni szilárdulásra, ha a gőzölt betont vízben tároljuk?
2. Hogyan alakul a gőzölés utáni szilárdulás, ha a betont különböző páratartalmú térben tároljuk?
3. Hogyan hat a gőzölés utáni szilárdulásra a különböző mértékű nedves utókezelés?
4. Hogyan szilárdul a zsaluzat nélkül gőzölt beton különböző utókezelés esetén?

A kutatás során felhasznált cementek kémiai és ásványi összetételét a 7.13. táblázat tartalmazza. A táblázat 3. oszlopában a diósgyőri granulált kohósalak összetételét is megadtuk, mivel a tatabányai cement egy részét – esetenként – kohósalakkal helyettesítettük.

7,07 cm élhosszú kockákat készítettünk, a cementtartalom mindig 450 kg/m^3 volt. Az adalékanyag 6 frakcióból összeállított, osztályozott és szárított dunai homokoskavics volt. $d_{\text{max}}=12$, finomsági modulus kb. 5 volt.

Víz-cement tényező	Betonkonzisztencia
0,32	földnedves
0,36	gyengén képlékeny
0,40	képlékeny
0,45	folyós

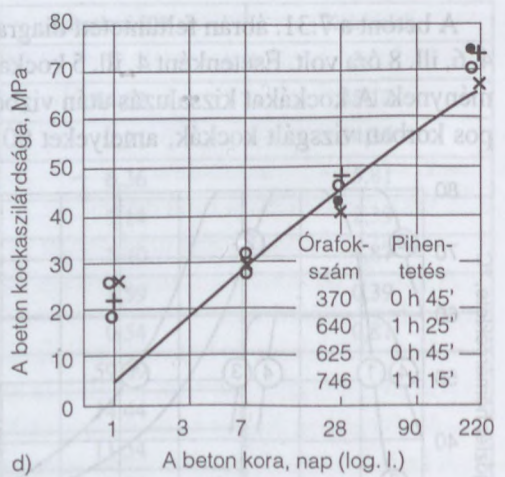
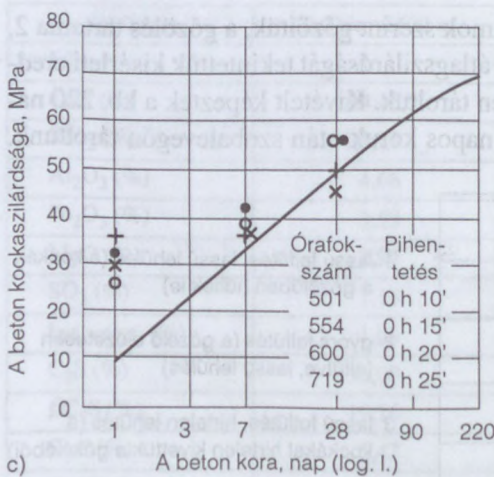
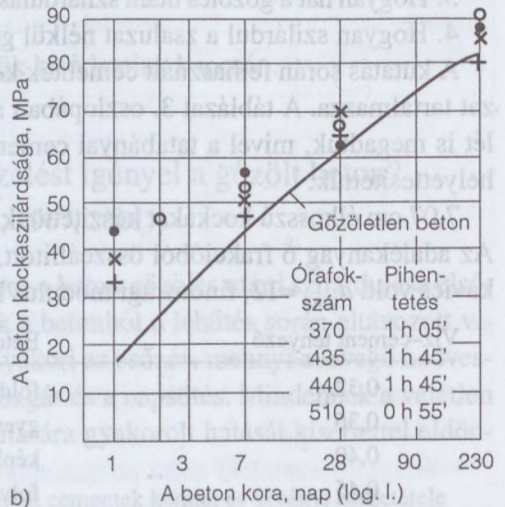
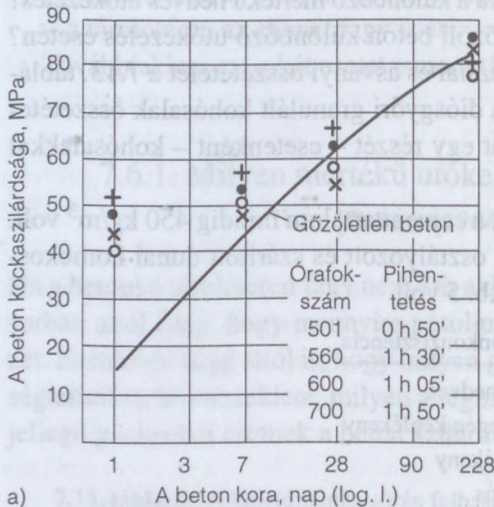
A betont a 7.31. ábrán feltüntetett diagramok szerint gőzöltük, a gőzölés tartama 2, 4, 6, ill. 8 óra volt. Esetenként 4, ill. 5 kocka átlagszilárdságát tekintettük kísérleti eredménynek. A kockákat kizsaluzás után vízben tároltuk. Kivételt képeztek a kb. 220 napos korban vizsgált kockák, amelyeket 90 napos koruk után szobalevegőn tároltunk.



7.31. ábra. A gőzölési diagramok típusai

A kísérlet eredményeit a következőkben foglaljuk össze:

a) Ha a betonban a gyors felfűtés és a gyors lehűtés miatt lényeges struktúraromlás nem következett be, akkor a gőzölés után vízben tárolt beton 7 napos korig annál lassabban szilárdult, minél nagyobb volt a gőzölés hatásfoka (7.32a ábra), a víz-cement tényező (7.32b és c ábra összehasonlítása) és minél kisebb volt a cement kohósalaktartalma (a tatabányai 600-as pc 20, 40, ill. 60 m%-át helyettesítettük kohósalakkal). 7 napos kortól kezdve a gőzölt beton szilárdsága közelítően megegyezett a 20 °C-os vízben tárolt természetesen szilárduló

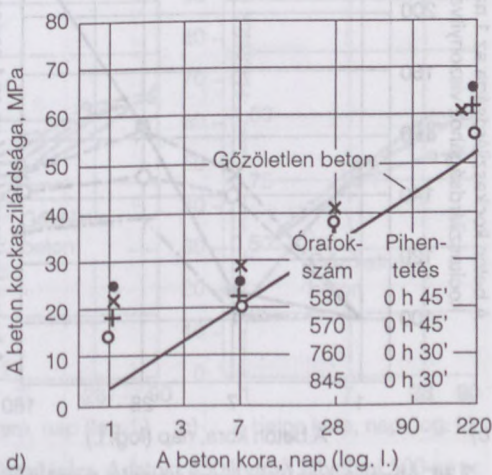
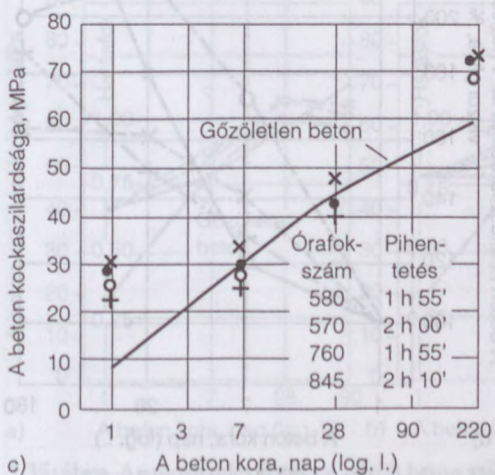
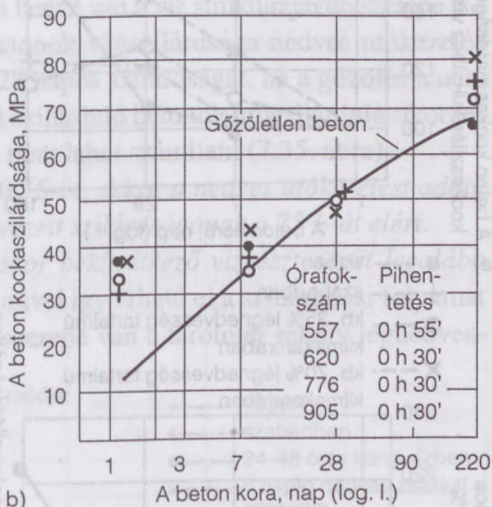
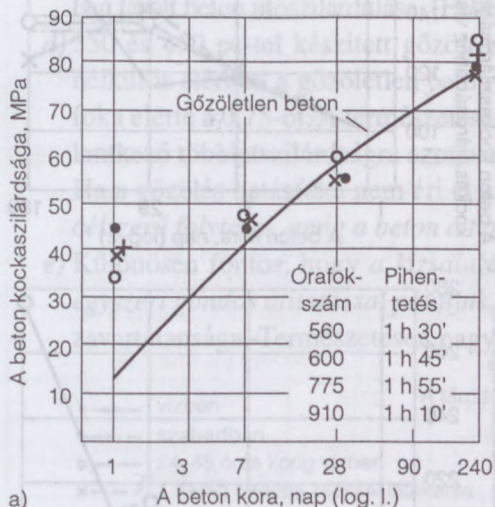


7.32. ábra. Vízben tárolt kockák gőzölési utáni szilárdulása.

Adatok: 450 kg/m³ tatabányai 600-as pc

- a) 0,32 víz-cement tényező, 1 jelű gőzölési diagram;
- b) 0,32 víz-cement tényező, 3 jelű gőzölési diagram;
- c) 0,40 víz-cement tényező, 1 jelű gőzölési diagram;
- d) 0,45 víz-cement tényező, 1 jelű gőzölési diagram.

betonával, sőt a kohósalaktartalmú gőzölt beton 28 napos szilárdsága nagyobb volt a gőzöletlen betonénál. Tehát azok a betonok, amelyek gőzölésének a hatásfoka nagyobb volt, közvetlenül a gőzölés után alig szilárdultak, míg amelyeké kisebb volt, a gőzölés után hamarosan behozták a szilárdság-elmaradásukat (7.33. ábra). Ha a betonkockákat gőzölés után vízben tároltuk, akkor a víz megjavította a gőzölt beton struktúráját (a szilárdságrontó portlandit egy része kioldódott, a víz feltörte a cementszemcse hidratálatlan magját körülvevő hidrátburkot), tehát nem volt törvényszerű, hogy a gőzölt beton 28 napos szilárdsága kisebb legyen a természetesen szilárdulóénál.

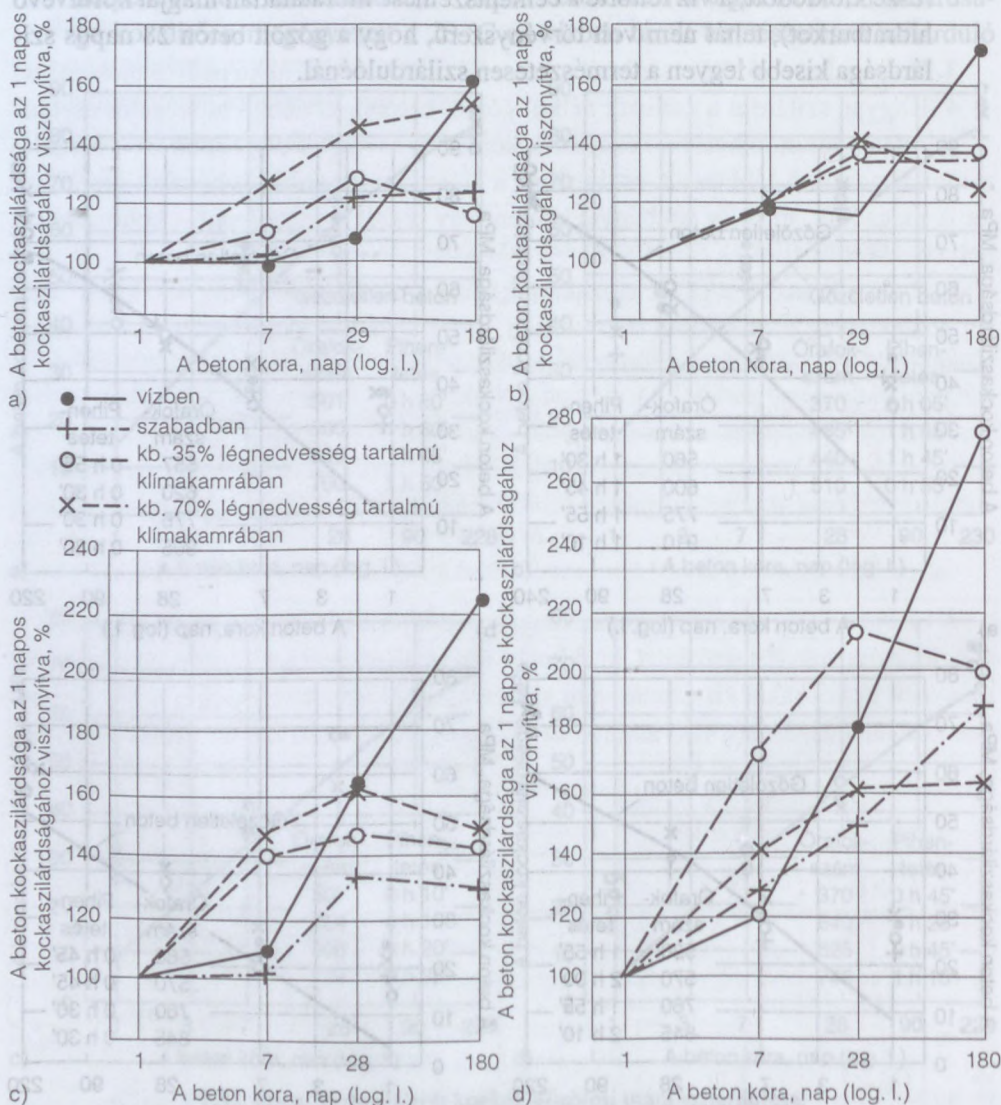


7.33. ábra. Vízben tárolt kockák gőzölési utáni szilárdulása.

Víz-cement tényező 0,36, izotermikus érlelés hőmérséklete kb. 80 °C, 2 jelű gőzölési diagram, 450 kg/m³ cement. A cement kohósalaktartalma: a) -; b) 20 m%; c) 40 m%; d) 60 m%

b) Ha a gőzölt beton nedves utókezelést nem kap, akkor nagy szerepe van a tárolóter relatív légnedvességének.

A gőzölt beton szilárdulását a gőzölés utáni szilárdsághoz viszonyítva arra az eredményre jutottunk, hogy a gőzölés után szabadban, 35, ill. 70% légnedvesség-tartalmú térben tárolt beton 28 napos korig még 20–60%-ot szilárdult ugyan 80 °C-on 6 órán át gőzölt betonok esetében is, de attól kezdve gyakorla-



7.34. ábra. A tárolóter légnedvesség-tartalmának a hatása a beton gőzölés utáni szilárdulására. Adatok: 450 kg/m³ tatabányai 600-as pc, gőzölés: 80 °C 6 órán át, lassú felfűtés, lassú lehűtés.

- a) 0,32 víz–cement tényező, földnedves, konzisztencia; b) 0,36 víz–cement tényező, gyengén képlékeny konzisztencia; c) 0,40 víz–cement tényező, képlékeny; d) 0,455 víz–cement tényező, folyós beton

tilag a szilárdulás megszűnt. 28 napos kor után minden esetben a gőzölés után vízben tárolt beton szilárdsága volt a legnagyobb (7.32a ábra).

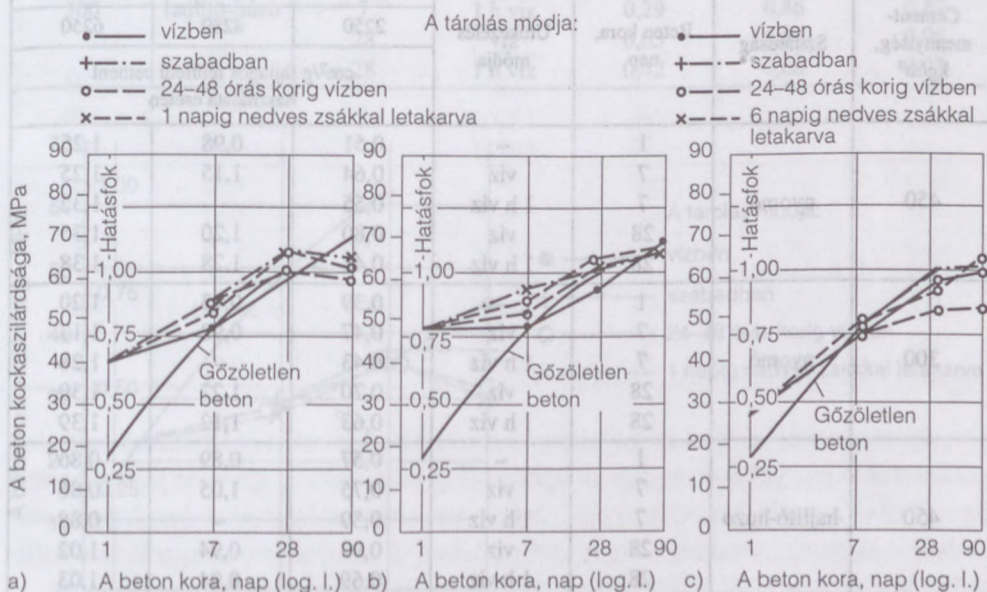
A gőzölés utáni szilárdulás mértéke azonos gőzölési technológia esetén a víz-cement tényezőtől is függött. 0,32 víz-cement tényezőjű beton gőzölés utáni szilárdulása kb. fele akkora volt, mint a 0,40 víz-cement tényezőjű betoné (7.32a és b ábra összehasonlítása).

c) A gőzölés utáni szilárdulás mértéke – azonos gőzölési technológia esetén – a víz-cement tényezőtől is függött. A 0,32 víz-cement tényezőjű beton gőzölés utáni szilárdulása kb. fele akkora volt, mint a 0,40 víz-cement tényezőjű betoné (7.34. ábra). 180 napos korban kb. 270% volt a 0,455 víz-cement tényezőjű, vízben tárolt beton utószilárdulása. (Ebben benne van a víz struktúrajavító szerepe is.)

d) 350 és 450 pc-tel készített gőzölt betonok végszilárdsága nedves utókezelés nélkül is elérheti a gőzöletlen beton 28 napos szilárdságát, ha a gőzölés határfoka elérte a 0,75-öt. A természetesen szilárduló betonok utószilárdulásakor jelentkező többletszilárdságra azonban nem lehet számítani (7.35. ábra).

Ha a gőzölés határfoka nem éri el a 0,75-öt, akkor a nedves utókezelést addig célszerű folytatni, amíg a beton a tervezett szilárdságának a 75%-át eléri.

e) Különösen fontos, hogy a kiszaluzáskor bekövetkező vízvesztéséget legalább egyszeri gondos átítatással pótoljuk, mivel így érhető el a szilárdulási folyamat zavartalansága. Természetesen nagy szerepe van a tárolóter relatív légnedves-



7.35. ábra. Az utókezelés hatása a gőzölt beton szilárdulására. Adatok: 450 kg/m³ lábatlani 500-as pc
a) 0,34 víz-cement tényező, gőzölés: 60 °C-on 2 órás izotermikus érlelés, sablonban gőzölve, lassú felfűtés, gyors lehűtés; b) 0,34 víz-cement tényező, gőzölés: 80 °C-on 4 órás izotermikus érlelés, sablonban gőzölve, lassú felfűtés, lassú lehűtés; c) 0,34 víz-cement tényező, gőzölés: 60 °C-on 2 óra izotermikus érlelés, sablonban gőzölve, lassú felfűtés, gyors lehűtés

ség-tartalmának. Ha a levegő nedvességtartalma nagy, és a levegő nagy hőmérséklete vagy az intenzív napsugárzás nem akadályozza, akkor a beton nedvességet vesz fel a levegőből és ezzel helyettesíthető a nedves utókezelés. Továbbá a vékony, ill. a zsalu nélkül gőzölt előre gyártott elemek nedves utókezelése még fontosabb, mint a vastag elemeké. Sablon nélkül gőzölt vékony elemek szilárdsága kedvező utókezelés esetén sem éri el a természetesen szilárduló beton 28 napos és későbbi szilárdságát.

A második kísérlet során a 7.7. táblázatban feltüntetett, különböző őrlési finomságú cementekkel vizsgáltuk a gőzölés utáni szilárdulást. A betont a gőzölés után a következőképpen tároltuk:

- vízben,
- 1 órán át vízben, azután szobalevegőn,
- szabadban.

A kísérlet eredményei a 7.14–7.17. táblázatban láthatók.

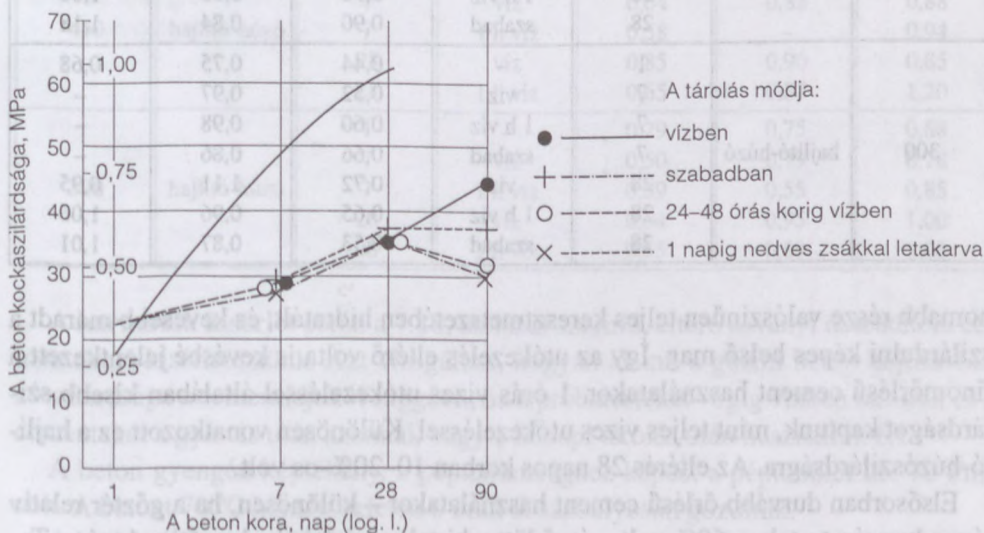
Kisebb cementtartalommal nagyobbra adódott az utószilárdulás. Durvább őrlésű cement többet szilárdulhatott még, míg gőzölés közben a finomabb őrlésű cement fi-

7.14. táblázat. 85 °C hőmérsékleten gőzölt betonok 1, 7 és 28 napos szilárdsága a természetesen szilárduló, I jelű cementtel készített beton 28 napos szilárdságához viszonyítva. (Gőzölés relatív légnedvesség-tartalma 100%, a lehűtés gyors, a gőzölés tartama 6 óra)

Cement-mennyiség, kg/m ³	Szilárdság	Beton kora, nap	Utókezelés módja	Viszonylagos szilárdság		
				2250	4280	6250
				cm ² /g fajlagos felületű cement használata esetén		
450	nyomó	1	–	0,51	0,98	1,25
		7	víz	0,64	1,15	1,25
		7	1 h víz	0,55	–	1,32
		28	víz	0,80	1,20	1,35
		28	1 h víz	0,48	1,28	1,38
300	nyomó	1	–	0,39	0,73	1,20
		7	víz	0,47	0,92	1,17
		7	1 h víz	0,43	–	1,28
		28	víz	0,70	1,22	1,39
		28	1 h víz	0,63	1,12	1,39
450	hajlító-húzó	1	–	0,57	0,89	0,86
		7	víz	0,75	1,05	0,86
		7	1 h víz	0,59	–	0,88
		28	víz	0,93	0,94	1,02
		28	1 h víz	0,69	0,94	1,03
300	hajlító-húzó	1	–	0,38	0,69	0,83
		7	víz	0,62	0,68	0,76
		7	1 h víz	0,41	–	0,79
		28	víz	0,73	0,98	0,97
		28	1 h víz	0,54	0,80	0,98

7.15. táblázat. 70 °C hőmérsékleten gőzölt betonok 1, 7 és 28 napos szilárdsága a természetesen szilárduló, I jelű cementtel készített beton 28 napos szilárdságához viszonyítva. (Gőztér relatív légnedvesség-tartalma 100%, a lehűtés gyors, a gőzölés tartama 6 óra volt)

Cement- mennyiség, kg/m ³	Szilárdság	Beton kora, nap	Kezelés módja	Viszonylagos szilárdság		
				I	III	V
				jelű cement használata esetén		
450	nyomó	1	–	0,42	0,87	1,27
		7	víz	0,56	1,03	1,35
		7	1 h víz	0,54	1,03	1,28
		28	víz	0,78	1,26	1,22
		28	1 h víz	0,65	1,18	1,22
300	nyomó	1	–	0,25	0,81	0,84
		7	víz	0,38	1,07	1,06
		7	1 h víz	0,31	1,06	1,13
		28	víz	0,50	1,39	1,18
		28	1 h víz	0,39	1,28	1,12
450	hajlító-húzó	1	–	0,49	0,86	1,07
		7	víz	0,56	0,86	1,01
		7	1 h víz	0,54	0,85	0,96
		28	víz	0,84	1,05	1,15
		28	1 h víz	0,71	0,88	1,01
300	hajlító-húzó	1	–	0,22	0,75	0,80
		7	víz	0,41	0,91	0,79
		7	1 h víz	0,29	0,86	0,87
		28	víz	0,63	1,04	0,96
		28	1 h víz	0,42	0,88	0,92



7.36. ábra. Az utókezelés hatása sablon nélkül gőzölt beton szilárdulására. Adatok: 450 kg/m³ lábatlani 500 pc, 0,30 víz-cement tényező, 80 °C-on 2 órás izotermikus érlelés 1 jelű diagram szerint

7.16. táblázat. 70 °C hőmérsékleten gőzölt betonok 1, 7 és 28 napos szilárdsága a természetesen szilárduló, I jelű cementtel készített beton 28 napos szilárdságához viszonyítva. (Gőztér relatív légnedvesség-tartalma 100%, a gőzölés tartama 6 óra, a lehűtés lassú volt)

Cement- mennyiség, kg/m ³	Szilárdság	Beton kora, nap	Kezelés módja	Viszonylagos szilárdság		
				2250	4280	6250
				cm ² /g fajlagos felületű cement használatára esetén		
450	nyomó	1	–	0,63	1,08	1,36
		7	víz	0,69	1,08	–
		7	1 h víz	0,90	1,27	–
		7	szabad	0,80	1,28	–
		28	víz	0,91	1,26	1,31
		28	1 h víz	0,86	1,36	1,30
		28	szabad	0,87	1,37	1,24
300	nyomó	1	–	0,35	1,04	1,11
		7	víz	0,45	1,20	–
		7	1 h víz	0,56	1,18	–
		7	szabad	0,55	1,16	–
		28	víz	0,67	1,47	1,39
		28	1 h víz	0,59	1,26	1,15
		28	szabad	0,53	1,27	1,11
450	hajlító-húzó	1	–	0,79	0,82	0,94
		7	víz	0,73	0,90	–
		7	1 h víz	0,88	0,99	–
		7	szabad	0,84	0,96	–
		28	víz	0,98	0,99	1,35
		28	1 h víz	0,96	0,96	1,06
		28	szabad	0,90	0,84	1,18
300	hajlító-húzó	1	–	0,44	0,75	0,68
		7	víz	0,52	0,97	–
		7	1 h víz	0,60	0,98	–
		7	szabad	0,66	0,86	–
		28	víz	0,72	1,11	0,95
		28	1 h víz	0,65	0,96	1,06
		28	szabad	0,53	0,87	1,01

nomabb része valószínűen teljes keresztmetszetében hidratált, és kevesebb maradt a szilárdulni képes belső mag. Így az utókezelés eltérő volta is kevésbé jelentkezett a finomőrlésű cement használatakor. 1 órás vizes utókezeléssel általában kisebb szilárdságot kaptunk, mint teljes vizes utókezeléssel. Különösen vonatkozott ez a hajlító-húzószilárdságra. Az eltérés 28 napos korban 10–20%-os volt.

Elsősorban durvább őrlésű cement használatakor – különösen, ha a gőztér relatív légnedvesség-tartalma 60% volt – érződött a hirtelen lehűtés kedvezőtlen hatása. Továbbá a 70 °C-on gőzölt beton annyival gyorsabban utószilárdult, mint a 85 °C-on gőzölt, hogy a szilárdságkülönbség 28 napos korra gyakorlatilag megszűnt.

Különösen a sablon nélkül gőzölt elemek utószilárdulása szempontjából fontos a gőzölés utáni vízben tárolás (7.36. ábra).

A kísérletekből azt következtetjük, hogy olyan tárolóteren, ahol utókezelés nincs, a nyári melegben, amikor a levegő nedvességtartalma is kicsi, kedvezőtlenebb helyzetben vannak az előre gyártott elemek, mint az őszi-tavaszi, ill. téli időszakban.

7.17. táblázat. 85 °C hőmérsékleten gőzölt betonok 1, 7 és 28 napos szilárdsága a természetesen szilárduló, I jelű cementtel készített beton

28 napos szilárdságához viszonyítva. (Gőztér relatív légnedvesség-tartalma 60%, a gőzölés tartama 6 óra, a lehűtés gyors volt: 4 jelű diagram szerint)

Cement- mennyiség, kg/m ³	Szilárdság	Beton kora, nap	Kezelés módja	Viszonylagos szilárdság		
				2250	4280	6250
				cm ² /g fajlagos felületű cement használata esetén		
450	nyomó	1	–	0,40	0,78	0,88
		7	víz	0,54	0,90	1,21
		7	1 h víz	0,50	–	1,27
		28	víz	0,76	1,15	1,24
		28	1 h víz	0,59	1,01	1,41
300	nyomó	1	–	0,31	0,70	0,92
		7	víz	0,42	0,92	1,27
		7	1 h víz	0,40	0,87	1,22
		28	víz	0,59	1,41	1,46
		28	1 h víz	0,50	1,01	1,39
450	hajlító-húzó	1	–	0,39	0,63	0,74
		7	víz	0,64	0,83	0,88
		7	1 h víz	0,58	–	0,94
		28	víz	0,85	0,90	0,85
		28	1 h víz	0,65	0,87	1,20
300	hajlító-húzó	1	–	0,29	0,75	0,68
		7	víz	0,50	0,79	0,78
		7	1 h víz	0,39	0,55	0,85
		28	víz	0,64	0,95	1,00
		28	1 h víz	0,55	0,69	1,06

A harmadik kísérlet során a 7.18. táblázat szerinti, eltérő ásványi összetételű cementekkel kísérleteztünk. Azt vizsgáltuk, hogyan alakul a gőzölt beton hajlító-húzószilárdsága a cementfajtától függően, ha a próbatesteket végig vízben tároltuk és a cementeket a gyártás után azonnal, vagy 1 hónapi tárolás után használtuk fel.

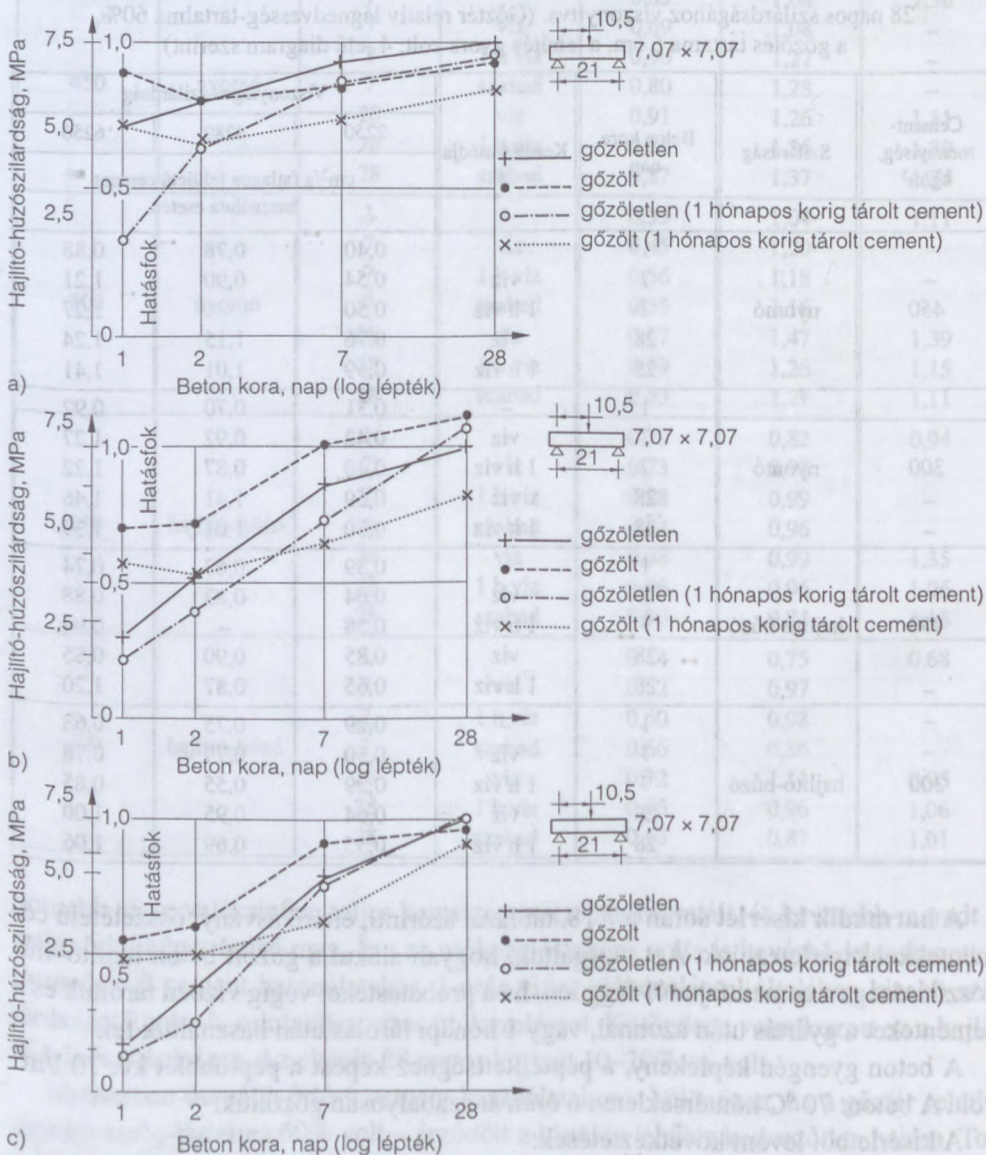
A beton gyengén képlékeny, a péptelítettséghez képest a péptöbblet kb. 70 l/m³ volt. A betont 70 °C hőmérsékleten 6 órán át szabályosan gőzöltük.

A kísérletből levont következtetések:

a) A gőzölés hatásfoka kedvezőbb hajlító-húzószilárdság, mint nyomó-szilárdság vonatkozásában (7.19. táblázat). Továbbá a nagy β C₂S-tartalmú cementek gőzö-

lésének a hatásfoka (a vizsgálat körülményei között) sokkal nagyobb a húzó-, mint a nyomószilárdság alapján.

b) A nagy C_3S -tartalmú V600 jelű cementtel készített beton esete azt mutatja, hogy a nagy hatásfokkal gőzölt beton 28 napos hajlító-húzószilárdsága még a gőzölés utáni vízben tárolás esetén is elmaradhat a természetesen szilárduló beton szilárdságához képest. Ugyanakkor az S jelű belitcement használatakor elérte, az N jelű belitcement használatakor kb. 10%-kal meghaladta azt (7.37. ábra).



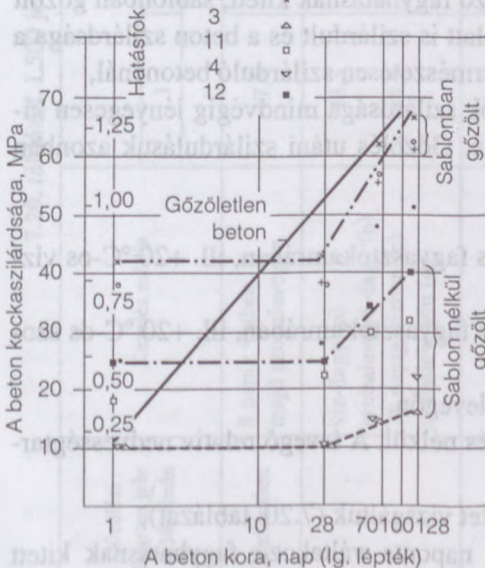
7.37. ábra. A cementfajta hatása a gőzölt beton hajlító-húzószilárdságára vízben tárolás esetén. a) V600; b) N; c) S jelű cement

7.18. táblázat. A cementek Bogue szerint számított ásványi összetétele, fajlagos felülete, sűrűsége és szilárdsága

Jellemző	A cement jele		
	V600	N	S
C ₃ S, m%	55,3	42,95	30,90
βC ₂ S, m%	18,4	29,83	42,57
C ₃ A, m%	10,4	1,61	2,25
C ₄ AF, m%	8,7	20,20	20,68
Cs, m%	4,1	3,28	1,96
M, m%	1,19	1,17	1,01
Fajlagos felület Blaine szerint, m ² /kg	3480	2200	2000
Sűrűség, g/cm ³	3110	3130	3060
Nyomószilárdság, MPa			
2 napos	14,5	9,0	5,1
7 napos	34,0	22,9	18,7
28 napos	47,0	32,8	26,4
91 napos	49,5	48,0	48,5
Hajlító-húzószilárdság, MPa			
2 napos	3,40	2,89	0,8
7 napos	6,20	5,17	4,06
28 napos	7,60	8,97	7,64
91 napos	8,20	9,28	8,27

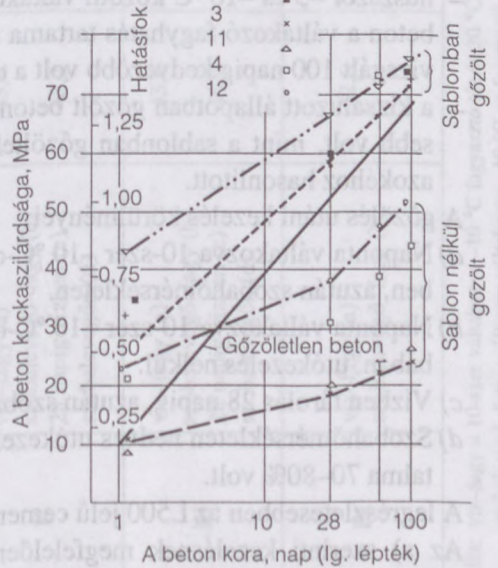
A kísérlet sorszáma: 1 jele: •

- 9 ○
- 2 +
- 10 ✕
- 3 △
- 11 ▽
- 4 ◁
- 12 ■



A kísérlet sorszáma: 1 jele: +

- 9 ○
- 2 +
- 10 ✕
- 3 △
- 11 ▽
- 4 ◁
- 12 ■



7.38. ábra. A fagy hatása a beton gőzölés utáni szilárdulására (jelmagyarázat a 7.20. táblázatban)

7.19. táblázat. Gőzölt beton 1 napos szilárdságának viszonya a természetesen szilárduló beton 28 napos szilárdságához

Cement jele	A gőzölés határfoka (a)	
	f_c , cube	f_{ct}
	alapján	
V600	0,80	0,90
N	0,44	0,70
S	0,37	0,54

7.6.2. A fagy hatása gőzölt betonok szilárdulására

[Balázs–Borosné–Zimonyi (1966), Fagyhatásnak... (1966), Balázs (1967)]

Hazánkban 3–5 hónapon át számolni kell azzal, hogy az előre gyártott elemek a tároló-terén ki vannak téve a fagy hatásának. Arról azonban keveset tudunk, hogy hogyan szilárdul a fagyhatásnak kitett gőzölt beton. Powers (1956) 1956. évi koppenhágai, Kunszt (1962) az 1961. évi prágai RILEM-szimposiumon és 1962. évi cikkében (1961) és Mironov (1974) olyan példákat hozott fel, amelyek szerint egyes esetekben a tárolás helyén fagyhatásnak kitett gőzölt beton kedvezően szilárdul.

A gőzölt beton fagybani szilárdulását a ténylegesen felmerülő igény miatt több kísérlet során megvizsgáltuk.

Már az előkísérletek, amelyekhez tatabányai 500-as pc-et használtunk, néhány fontos eredményt hoztak (7.38. ábra):

- a gőzölt beton sem szilárdult – 20 °C-on,
- húszszor –5 és –10 °C közötti váltakozó fagyhatásnak kitett, sablonban gőzölt beton a váltakozó fagyhatás tartama alatt is szilárdult és a beton szilárdsága a vizsgált 100 napig kedvezőbb volt a természetesen szilárduló betonénál,
- a kiszaluzott állapotban gőzölt betonok szilárdsága mindvégig lényegesen kisebb volt, mint a sablonban gőzölteké. Gőzölés utáni szilárdulásuk azonban azokéhoz hasonlított.

A gőzölés utáni kezelés körülményei:

- a) Naponta váltakozva 10-szer –10 °C-os fagyasztókamrában, ill. +20 °C-os vízben, azután szobahőmérsékleten.
- b) Naponta váltakozva 10-szer –10 °C-os fagyasztókamrában, ill. +20 °C-os szobában, utókezelés nélkül.
- c) Vízben tárolás 28 napig, azután szobalevegőn.
- d) Szobahőmérsékleten nedves utókezelés nélkül. A levegő relatív nedvességtartalma 70–80% volt.

A legrészletesebben az L500 jelű cementet vizsgáltuk (7.20. táblázat).

Az a) szerinti kezelésnek megfelelően naponta váltakozó fagyhatásnak kitett (víz–fagy), valamint gőzölés után 28 napig vízben tárolt gőzölt betonok 28 napos és

7.20. táblázat. L500 jelű cementtel készített betonok és pépek szilárdulása

Gőzölési diagram jele a 7.38. ábrán	Kezelés módja	Betonok kockaszilárdsága, MPa				Pépek kockaszilárdsága, MPa					
		28		90		180		1		28	
		napos korban									
	8 napig vízben, majd szobalevegőn	17,6	58,5	69,4	72,1	28,0	112,5			118,1	
I	víz-fagy (a)	43,3	58,6	64,0	73,8	68,3	95,1			141,3	
	szobalevegő-fagy (b)		62,5	68,7	64,5		95,8			102,4	
	28 napig vízben (c) szobalevegőn (d)	45,5	62,0	79,8	75,2	76,3	98,8			138,0	
II	víz-fagy (a)	43,0	58,6	72,2	74,5	49,7	83,0			126,9	
	szobalevegő-fagy (b)		59,1	64,2	64,5		82,6			86,3	
	28 napig vízben (c) szobalevegőn (d)	43,2	63,2	75,5	78,0	71,5	108,8			127,2	
III	víz-fagy (a)	43,6	59,6	74,0	72,5	71,1	81,8			113,6	
	szobalevegő-fagy (b)		58,7	65,2	60,0		82,8			101,6	
	28 napig vízben (c) szobalevegőn (d)	45,9	56,5	73,7	72,3	65,1	80,6			116,0	
IV	víz-fagy (a)	32,6	53,9	72,0	74,2	48,7	84,2			121,9	
	szobalevegő-fagy (b)		57,3	65,5	66,2		85,8			103,3	

Jelölés: víz-fagy = 10-szer váltakozva -10 °C fagyasztó tér és 20 °C-os víz
szobalevegő-fagy = 10-szer váltakozva -10 °C-os fagyasztó tér és 20 °C-os szobalevegő

Irodalom

- A cement összetételének és fizikai állapotának hatása a gőzölhetőségre. – SZIKKTI 27.02.51.02 témaszámú kutatás zárójelentése, 1967. Témafelelős: Révay M.
- Alexander, K. M.–Wardlaw, J.–Gilbert, D. J.: Aggregate-cement bond, cement paste strength and the strength of concrete. – Proceedings of an International Conference on the Structure of Concrete. – Imperial College London, Sept. 1965. Cement and Concrete Association. Session B. 59–81.
- Balázs Gy.: Beton és vasbeton V. A kutatás története – 2004.
- Balázs Gy.: A beton szilárdulása hideg időben. – Mélyépítéstudományi Szemle, 1961, 11., 507–515.
- Balázs Gy.: A beton kötésének és szilárdulásának gyorsítása. ÉKME Tud. Közl. VIII. k., 1962, 3, 219–238.
- Balázs Gy.: Betonszilárdulás a gőzölés és a kalciumklorid együttes alkalmazásával. Kandidátusi értekezés, 1963.
- Balázs Gy.: A beton szilárdulása a gőzölés után. – Magyar Építőipar XIII., 1964, 10., 583–589.
- Balázs Gy.: Die Hydratation des – der Frosteinwirkung ausgesetzt – dampf-gehärteten Betons. – Int. Konferenz für Baustoffe, Warszawa, 6–8 VI. 1967.
- Balázs Gy.: A betonszilárdítás gyorsítása a cement őrlési finomságának növelése útján. – Magyar Építőipar XVIII., 1969, 169–172.
- Balázs Gy.: A betonstruktúra elemzése a korszerű betontechnológia követelményei alapján. – BME Építőanyagok Tanszék Tudományos Közlemények 34. kötet. 1982, 5–40.
- Balázs Gy.: A betonstruktúra elemzése. – Akadémiai doktori értekezés, 1982.
- Balázs Gy.: Építőanyagok, kémia. – Tankönyvkiadó, 1984, 656 old.
- Balázs Gy.: Der Zementstättigungswert als eine wichtige Kenngröße der Betonstruktur. – Baustoffe, 1985, 1–9. Bauverlag
- Balázs Gy.: Betonszilárdítás a hidratációhő felhasználásával. – Szilikát-technika, 1985, 5. sz., 97–101.
- Balázs Gy.: Energiatakarékos betonszilárdítás. – Műszaki Könyvkiadó, 1987, 224 old.
- Balázs Gy.: Vízépítési cementtel kapcsolatos kutatások. – Építőanyag, 1987, 3. sz., 79–87.
- Balázs Gy.: A péptelítettség mint struktúra jellemző. – Építőanyag, 1988, 4. sz., 125–128.
- Balázs Gy.: Gőzölt beton struktúráváltozása és szilárdsága fagy hatására. – XV. Szilikátipari és Szilikáttudományi Konferencia q, 1989, 151–156.
- Balázs Gy.: Barangolásaim a betonkutatás területén. – Akadémiai Kiadó, 2001.
- Balázs Gy.–Arany P.–Ostermann L.: Heterogéncementek gőzölhetősége. – Építőanyag, 1981. 9. 343–352.
- Balázs Gy.–Arany P.–Liptay A.: Kohósalakkötőanyagú beton. – Építőanyag, 1986, 8, 246–249.
- Balázs Gy.–Berényi M.–Szentiványi B.: Hőmérsékleti feszültségek a gőzölt betonban. – BME Építőanyagok Tanszék Tudományos Közlemények 5. kötet. KÖZDOK, 1972.
- Balázs Gy.–Berényi M.–Szentiványi B.: Thermal stresses in steam-cured concrete. – Periodica Polytechnica 1973. No. 3–4, 121–134.
- Balázs Gy.–Boros J.-né–Zimonyi Gy.: Fagyhatásnak kitett gőzölt beton szilárdulási folyamatának tanulmányozása. – ÉKME Építőanyagok Tanszéke 204/1966. sz. kutatási jelentés.
- Balázs Gy.–Boros J.-né–Zimonyi Gy.: A cement hidratációhője (irodalomtanulmány). – BME Építőanyagok Tanszék Tudományos Közlemények 12. kötet. KÖZDOK, 1973, 1–122.

- Balázs Gy.–Erdélyi A.–Weiss Gy.: Tömegbeton. Felsőoktatási Jegyzetellátó V. 1968.
- Balázs Gy.–Erdélyi A.–Horváth A.–Opatzky L.–Zimonyi Gy.: Kísérletek tömegbetonokhoz alkalmas cementekkel. – Mélyépítéstudományi Szemle, 1968. 1. 18–26.
- Balázs Gy.–Fehér J.–Szombathy Z.–Tóth A.–Zimonyi Gy.: A Paksi Atomerőmű betonfalai hőtechnikai vizsgálata a betonozást követő időszakban. – BME Építőanyagok Tanszék Tudományos Közlemények 31. kötet. KÖZDOK, 1982.
- Balázs L. Gy.–Kausay T.: Az MSZ EN 206–1 betonzabvány és alkalmazása. – Beton évkönyv 2005, 45–62.
- Balázs Gy.–Kilián J.: A hazai cementekkel készült betonok szilárdulása alacsony hőmérsékleten. – Mélyépítéstudományi Szemle, 1953, 406–409.
- Balázs Gy.–Kilián J.: A cementkő és az adalékanyag közötti tapadás. – BME Építőanyagok Tanszék Tudományos Közlemények 21. kötet, 1975, KÖZDOK, 41–56.
- Balázs Gy.–Kolostori J.–Székely I.: Nagy és külön legesen nagy szilárdságú cementek (550 pc) felhasználásában rejlő lehetőségek. – Magyar Építőipar, 1989, 4, 171–178.
- Balázs Gy.–Kunszt Gy.: A gőzölt betonszerkezetek romlásának okai. – Magyar Építőipar 1965, 9, 543–549.
- Balázs Gy.–Kunszt Gy.: A betonszilárdítás terén elért legújabb eredmények. – Magyar Építőipar 1965, 701–709.
- Balázs Gy.–Liptay A.–Tóth A.–Zimonyi Gy.: Beton pályatábla és földmű hőmérsékletének számítása. – BME Építőanyagok Tanszék Tud. Közl., 1981, 25. k., 1–88.
- Balázs Gy.–Rácz K.–Suri K.–Varga J.–Tóth J.: Paksi Atomerőmű hulladékártoló építéstechnológiai kidolgozása. 3. sz. jelentés. Hőtechnikai számítások az építés közbeni káros hőmérsékleti feszültségek elkerülése céljából. Erőmű és Hálózattervezési Vállalat megbízásából végzett kutatás, 1988.
- Balázs Gy.–Suri K.: Betonszilárdítás a hidratáció hő felhasználásával. Az ÉVM 7. Célprogram keretében az Építőanyagok Tanszék irányításával folyó kutatás. Megbízók még: Cement- és Mészművek, Beton- és Vasbetonipari Művek, Szolnok megyei ÁÉV. (1985)
- Balázs Gy.–Tamás F.: Investigations onto mechanism of calcium chloride effect in case of natural and steam curing conditions – RILEM Konferencia, Moszkva, 1964, 1–16.
- Balázs Gy.–Tóth A.–Liptay A.–Zimonyi Gy.: Pályatábla és földmű hőmérsékletének a számítása. – Építőanyag Tanszék Tud. Közl. 25., KÖZDOK (1981), 1–88.
- Balázs Gy.–Zimonyi Gy.–Zobel L.: Előre gyártott beton egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás okozta feszültségei és repedései. – Mélyépítés-tudományi Szemle, 1967. 6. sz.
- Balázs Gy.–Zsigovics I.–Ostermann L.: Heterogéncementek hidegérzékenysége. – Építőanyagok 1980, 7. sz., 255–262.
- Basalla, A.: Ein adiabatisches Kalorimeter zur Bestimmung der Wärmeentwicklung im Beton. – Zement–Kalk–Gips (1962), 136–140.
- Bennett, E. W.–Gukhale, V. G.: Some experiments on the compaction of cement paste. – The Indian Concrete Journal, Vol. 41, 1967, 421–428.
- Berkovics, T. M.–Hejker, D. M.–Gracsova, O. I.–Volkov, O. Sz.–Mihajlovskaja, Je. Sz.: Processzi gidraticii pri uszkorennom tvergyenyii cementa. – Szimposium RILEM, Moszkva, 1964.
- Bogue, R. H.: Chemistry of Portland Cement. New York, 1955.
- Brandt, W.: Über die Zeit-Temperatur-Abhängigkeit der Erhärtung verschiedener Zementarten. – Zement–Kalk–Gips, 1956.
- Brunauer, S.–Emmett, P. H.–Teller, E.: Absorption of gases in multimolecular layers. – Journal of the American Chemical Society. 1938, Vol. 60, 309.
- Buday T.: Betonadalékszerek. – ÉTK Kft., 1999.
- Budiko, M. J.: Tyeplovoj balans zemnoj proverhnoszti. – Moszkva, 1956.
- Budnyikov, P. P.–Rojak, S. N.–Malinyin, Ju. S.–Majanto, M. M.: Issledovanyije processzov gidraticij portlandcementsa pri tyeplovlaznosztnoj obrabotke pri tyemperature do 1000 °C. – Szimposium RILEM, Moszkva, 1964, I. 6.

- Butt, Ju. M.–Tyimasev, V. V.–Lukackaja, L. A.: Uszkorenijije tvergyenyija cementov pri tyemperaturah 20–100 °C. – Szimpozium RILEM, Moszkva, 1964, I. 8.
- Butt, Ju. M.–Kolbasov, V. M.–Tyimasev, V. V.: High temperature curing of concrete under atmospheric pressure. – Session III.–4b–5th. Int. Symp. Chemistry of Cement, Tokyo, 1969.
- Butt, Ju. M.–Tyimasev, V. V.–Venstejn, Ju. I.–Bocskova, R. I.–Iljuhin, V. V.: Szrasztanyije gidrookszizsi kalcija sz kvarcem is kalcitom. – Cement, 1972, 5, 13–14.
- Conjeaud, M.–Lelong, B.–Cariou, B.: Bond between Portland cement paste and natural aggregates. – 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, 1980. VII. 6–11.
- Danyushevsky, V. S.–Djabarov, K. A.: Interrelation between pore structure and properties of hydrated cement pastes. – International Symposium RILEM/IUPAC, Prague, 1973, Preliminary Report.
- Erdélyi A.–Borján J.–Szabó J.: A vízepítési betonok kopási mértékének meghatározása. – A VIZITERV megbízásából az Építőanyagok Tanszéken készített tanulmány (1971).
- Erdélyi A.–Valtynyi D.: Légpórusos időjárásálló betonok és légpórusképző szerek fejlődése. – ÉTK Inf. Osztály V. sz. 5/76 tanulmány (1977)
- Energiatakarékosság a hidratációhő felhasználásával (550 pc). – ÉVM 2. Célprogram Bizottság megbízásából készített tanulmány, 1987. Témafelelős: dr. Balázs György.
- Fagerlund, G.: Strength and porosity of concrete. – International Symposium RILEM/IUPAC Prague, 1973, Preliminary Report, II, D51–73.
- Fagerlund, G.: The elastic modulus of concrete. – International Symposium RILEM/IUPAC Prague, 1973, Preliminary Report, II, D129–D141.
- Fagyhatsnak kitett gőzölt beton szilárdulási folyamatának tanulmányozása. – Az EKME Építőanyagok Tanszék 204/1966 sz. kutatási jelentése. Témafelelős: Balázs Gy.
- Farran, J.: Contribution minérale à l'étude de l'adérence entre les constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés. – Revue des Matériaux de Construction, 491/1956, 155–172 és 492/1956, 191–209.
- Fedorov, V. A.: Vlijanyie rezsimov i uszlovij proparivanyija na morozosatojkoszky betonov. – Konferenciya RILEM, Moszkva, 1964.
- Gaca W.: Cementek gyors szilárdságvizsgálata. – Építőanyag, 1965, 2. sz. 61–68.
- Gerstner, B.–Henning, O.: Untersuchungen zum chemischen Verhalten der Zuschlagstoffe im Zementbeton. – Baustoffindustrie, 18 B3/1975. 21–25.
- Glukovszkij, K. A.–Krilov, N. A.–Poliscsuk, A. N.: Upravlenijije processzom tvergyenyija betona. – Szimpozium RILEM, Moszkva, 1964. I. 7.
- Gorjajnov, K. Je.–Veksler, Je. Sz.: Gyesztrukcija tvergyenyijem betone rannyevo vozraszta pri nagreve i szposzobem umenysenyija proparivnyija. – Szimpozium RILEM, Moszkva, 1964.
- Grusko, I. M.–Iljin, A. G.–Rasevskij, Sz. T.: Procsnoszty betonov na rasztyazsenijije. – Egyetemi Kiadó, Harkov, 1973.
- Gyengő T.: A beton kiszáradásáról. Magyar Építőipar, 1979. 11. 675–677.
- VI. Internationaler Kongress Über Zementchemie. – Zement-Kalk-Gips 28. 5/1975. 189–213.
- Hampe, B.: Temperaturschaden im Beton insbesondere im Massenbeton. – W. Ernst Verlag, Berlin (1942).
- Hellmann, H. G.: Beziehungen zwischen Zug- und Druckfestigkeit des Betons. – Beton 2., 1969. 68–70.
- Hsu, T. T. C.–Slate, F. C.: Tensile bond strength between aggregate and cement paste or mortar. – Journal of the American Concrete Institute, No. 60, 1963, 465–486.
- Idorn, G. M.: Hydration of Portland cement paste at high temperature under atmospheric pressure. – Principal paper – Session III – 4a., Proceedings 5th Internal Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1969.
- Jirku E.: A cementfajta hatása a beton gőzölthetőségére. – Építőanyag, 1962, 318.
- Kajszer, L. A.: Kinyetyika tvergyenyija portlandcementov v uszlovijah proparivanyija. – Szimpozium RILEM, Moszkva, 1964.

- Kausay T.: Az adalékanyag jellemzése szemcsealak szerint. – Mélyépítéstudományi Szemle, 15. 1966, 6. sz. 290–296.
- Kausay T.: A szemcsealak hatása a betonszilárdságra. – Mélyépítéstudományi Szemle, 1966, 10. sz., 476–482.
- Kausay T.: Az adalékanyag jellemzése szemcsealak szerint. – Műszaki doktori értekezés, 1967.
- Kausay T.: Szemszerkezet javításának megtervezése grafikus úton. – Mélyépítéstudományi Szemle, 18, 1968, 3, 127–130.
- Kausay T.: Összefüggés a zúzottkő- és kavicstermékek szemalakja és Los Angeles vizsgálat szerinti aprózódási vesztesége között. – Építőanyag, 1971, 7. sz., 248–254. és 8. sz., 288–297.
- Kausay T.: Halmazgeometriai jellemzők a szemalak függvényében. – Építőanyag, 1971, 11. sz., 422–427.
- Kausay T.: A beton adalékanyagok szemszerkezeti tulajdonságai és a szemszerkezet komplex jellemzőmódja. – Kandidátusi értekezés, 1976.
- Kilián J.: Cementek és betonok szilárdulási folyamatának, szerkezetének, határszilárdságának kutatása különös tekintettel a gőzölésre. – Építőanyagok Tanszék Tudományos Közlemények 2. kötet. KÖZDOK, 1970, 7–38.
- Kilián J.–Székely I.: A cementkő gőzölés közben kialakuló szerkezetének néhány problémája. – Építőanyag, 1967, 2. sz., 41–48.
- Kondo, R.–Daimon, M.: Phase composition on hardened cement paste. – A principal paper. – The VI. International Congress on the Chemistry of Cement. Moscow, Sept. 1974. II-3.
- Kunszt Gy.: A beton kezdőszilárdsága és szilárdulásának gyorsítása. – Felsőoktatási Jegyzetellátó V. 35/58. sz. jegyzet, 1960.
- Kunszt Gy.: Results of preliminary tests on frost resistance of steam-cured concrete. – Int. Symp. Durability of Concrete, Prága, 1961, 249–265.
- Kunszt Gy.: Supplementary remarks on the durability of steam-cured and blast-furnace slag cement concretes. – Int. Simp. Durability of Concrete (Final Report) Prague, 1962, 419–421.
- Kunszt Gy.: Külső tényezők hatása a gőzöléssel szilárdított betonra. Építőanyag, 1962. 11, 393–396.
- Kurczyk, H. G.–Schwiete, H. E.: Elektronmikroskopische und thermo-chemische Untersuchungen über die Hydratation der Calciumsilikate $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ und $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ und Einfluß von Calciumchlorid und Gips auf die Hydratationsvorgänge. – Tonindustrie-Zeitung und Keramische Rundschau, 24, 1960, 585–598.
- Lawrance, C. D.: The properties of cement paste compacted under high pressure. – Cement and Concrete Association, 1968, 21. (Research report, No. 19.).
- Likov, A. V.: Typlomasszoobmen. – Moszkva, 1972.
- Locher, F. W.–Richartz, W.: Study on the hydration mechanism of cement. – A principal paper. The VI. International Congress on the Chemistry of Cement. Moscow, Sept. 1974, II-2b.
- Malinowsky, R.: Beschleunigung der Wärmebehandlung des gepressten Betons in dichtgeschlossenen Formen. – Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 1963.
- Massazza, F.–Pezzuoli, M.: Cement paste – quartz bond in autoclaved concretes. – 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, 1980. VII. 16–21.
- Mcsedlov-Petroszjan, O. P.–Bunakov, A. G.–Vorobjov, Ju. L.: Fiziko-himiceszkije osnovni napravlenovo sztrukturoobrazovanyija pri uszkorenennom izgotovlenyija zselezobetonnih izgyvelij. – Szimpozium RILEM, Moszkva, 1964.
- Mikhejev, A. A.: Fundamentals of Meat Transfer. – Mir, Moszkva, 1968.
- Mironov, Sz. A.: A téli betonozás elmélete és módszerei. – ÉM Építőipari Könyv- és Lapkiadó V., 1953.
- Mironov, Sz. A.–Malinyina, L. A.: Uszkorenyije tvergyenyija betona. – Moszkva, 1961.
- Mironov, Sz. A.: Frost – resistance of concrete after heat treatment. – Int. Symp. Durability of Concrete, Prague, (Final Report) 1962, 235–240.
- Mironov, C. A.: Nyekoterije oboscsennija po tyeorü i tyehnologü uszkorenija tverdenija betona. – Konferencia RILEM, Moszkva, 1964.

- Nersz, R. Ju.–Jitszker, I.: Iszpitanyija proparennovo betona na procsnoszty. – Konferencija Rilem, Moszkva, 1964.
- Möller, K.–Brzesky, A.: Beton és vasbeton. – Királyi Magyar Egyetemi Nyomda, Budapest, 1937.
- Nagy A-né: Cementek gyors minősítő vizsgálata. – SZIKKTI 1965, 65. sz. kutatási jelentés.
- Ost, B. W.: Optimum sulphate content of portland cements. – American Ceramic Society Bulletin, 53, 1974, 8. sz. 579–582.
- Palotás L.: Építőanyagok. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1961.
- Palotás L.: A beton hőmérséklet-változás okozta saját feszültségei. – Mélyépítéstudományi Szemle, 1970, 8. sz.
- Palotás L.–Balázs Gy.: Mérnöki szerkezetek anyagtana 3. Beton-habarcs-kerámia-műanyag. – Akadémiai Kiadó, Bp. 1980.
- Palotás L.–Kilián J.–Balázs Gy.: Betonszilárdítás. – Műszaki Könyvkiadó, 1968.
- Popovics S.: A betonadalék szemszerkezetének számszerű jellemzéséről. – MTA Műszaki Tud. Osztály Közleményei, VII. évf. 1–3., 1952, 42–75.
- Popovics S.: Eljárások a betonadalék szemszerkezetének elbírálására. – Mérnöki Továbbképző Intézet, M3 füzet, 1952.
- Popovics S.: Strength and related properties of Concrete. – John Wiley & Sons, Inc, New York, 1998.
- Powers, T. C.: The nonevaporable water content of hardened Portland cement paste – its significance for concrete research and its method of determination. – Bulletin 29. Research and development laboratories of Portlans Cement Association. June, 1949.
- Powers, T. C.: The physical structure of cement and concrete. – Cement and Lime Manuf., 29, 1956, 13–24.
- Powers, T. C.: Resistance of concrete to frost at early ages. – RILEM Symposium, Copenhagen, 1956.
- Powers, T. C.: The Chemistry of Cements. – Chapter 10, edited by Taylor, H. F., Academic Press, 1964.
- Powers, T. C.–Brownyard, T. L.: Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. – Journal of the American Concrete Institute, October, November and December 1946, January, February, March and April 1947. Proc. Vol. 43. 101–132, 249–342, 469–504, 549–595, 669–712, 845–880, 933–992.
- Puskás B.-né: Hazai dolomit betonadalékanyagok alkáli reakciójának kutatása. – SZIKKTI-ben 1983-ban készített kutatási jelentések.
- Rehm, G.–Zimbelmann, R.: Untersuchung der Kontaktzone zwischen Zuschlag und Zementmatrix maßgebenden Faktoren. – Stuttgart, 1976.
- Reinsdorf, S.: Betondampfung unter atmosphärischem Dampfdruck mit Erwärmung des Betons auf Temperaturen bis 100 °C. – Symposium RILEM, Moszkva, 1964.
- Révay M.: A cement összetételének és fizikai állapotának hatása a gőzölhetőségre. – SZIKKTI 27.02.51.02 témaszámú kutatás zárójelentése, 1967.
- Révay M.: Javaslat a cementek gőzölhetőségének a vizsgálatára. – Építőanyag, 1967. 8. sz. 287–293.
- Révay M.–Nagy A.-né: A szilárdulási idő és a szilárdság közötti összefüggés és ennek matematikai leírása. – SZIKKTI kutatási jelentés 1966.
- Richartz, W.–Locher, F. W.: Ein Beitrag zur Morphologie und Wasserbindung von Kalziumsilikathidraden und zum Gefüge des Zementsteines. – Zement-Kalk-Gips, 1965, 449.
- Rojak, Sz. M.–Csurkaszova, A. F.–Jacsina, E. T.: Vlijanyije tyeplovlaznosznoj obrabotka na tverdenije slakoportlandementa. – Konferencija RILEM, 1964.
- Roy, D. M. – Gouda, G. R.: Optimization of strength in cement pastes. – Cement and Concrete Research, 5, 1975, 153–162.
- Šatava, V.: Relation between pore structure and mechanical properties of materials. – International Symposium RILEM/IUPAC Prague, 1973, General Report, Topic 2.1. D1–D19.
- Saul, A. G. A.: Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. – Mag. of Conc. Res. London, 1951.

- Schwiete, H. E.: Die Hydratation der verbindungen $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ und $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. Forschungsberichte, 748/1959.
- Schwiete, H. E.–Ludwig, U.–Jäger, P.: Untersuchungen im System $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot\text{CaO}\cdot\text{H}_2\text{O}$. Zement–Calc–Gips, 17, 1964, 6, 229–236 und 9, 379–386.
- Sejkin, A. Je.: Puty polucsenyija viszokoprocskih betonov. – Beton i Zselezobeton, 1957, 4, 113–118.
- Setzer, M. J.: Frostmechanizmus und Frost- und Feumittel-Angriff. – Fachtagung 10/11 März 1987. Bayerische Bauindustrieverband a. V. München und Baustoffinstitut der Technischen Universität München, 23–27.
- Skalny, J. P.–Bajza, A.: Properties of cement pastes prepared by high pressure compaction. – Journal ACI. 1970, March, 221–227.
- Smolczyk, H. G.: Hydration products of cements with high contents of blast-furnace slag. – Zement-Kalk-Gips, 18, 1965, 238–246.
- Szabó J.: Vizépítési betonok kopási mértékének meghatározása. – TDK-dolgozat, 1971. Szakvezető: Borján József.
- Szemonov, L. A. – Podgyurovskij, Hl. – Volkovskij HN: Tyeplovlaznosznaja obrabotka betona v beznapornih kamerah proparivanyija. – Konferencija RILEM, Moszkva, 1964.
- Szimeonov, J.: Ekzotermija i szhvanye na cimenta i betona maszivnyitye jazivirnyi ctyenyi. – Szófia, BAN, 1959.
- Szizov, V. H.: Téli építési munkák. Építésügyi Kiadó. Budapest, 1953.
- Tamás F.: Kutatások a cementszilárdulás kémiájának a területén. – SZIKKTI Tudományos Közlemények, 17. kötet. 1968.
- Tamás F.: A cementszilárdulás mint szilikát-oligomerizációs folyamat. – Akadémiai doktori értekezés, 1977.
- Taylor, J. E.: Kalcium szilikát-hidrátok képződéshője. – Építőanyag (1969), 87–89.
- Taylor, M. A.–Broms, B. B.: Shear bond between coarse aggregate und cement paste or mortar. Journal ACI, August, 1964, 939–957.
- Togron, G. P.–Ursella, P.–Copetti, G.: Bond strength in very high strength concrete. – 7 th. International Congress on the Chemistry of Cement. – Paris, 1980, VII., 75–80.
- Tomäi–Finkenwalde: A portlandcement szilárdulása. – Tonindustrie Zeitung, 1895, 12, 171–179.
- Ujhelyi, J.: Az adalékanyag tömörsége és pépigénye. – Építőanyag 1988, 3. sz., 81–90.
- Ujhelyi, J.: A beton struktúrája. – BME Építőmérnöki Kar Szerkezetépítő Szakmérnöki Szak Betontechnológia ágazat, Budapest, 1997. (szakmérnöki jegyzet)
- Ujhelyi, J.: Betonismeretek. – Egyetemi tankönyv. BME Építőmérnöki Kar Szerkezetépítő Szakmérnöki Szak Betontechnológiai ágazat. Műegyetemi Kiadó, 2005.
- Valtyni, D.: A vasbeton korróziója és korrózióvédelme. Magyar Építőipar, 1995, 5–6. sz. 193–195.
- Vavřin, F.: Effect of chemical additions on hydration processes and hardening of cement. – A principal paper. The VIth International Congress on the Chemistry of Cement. Moskow, Sept., 1974, II-6.
- Veic, R. I.: O primenyenii 2%-novo rasztvora hlorisztovo kalcija v sztrunobetonje. – Sztrouyelnaja Promislenosztzy, 1954, 9, 23–25.
- Vénuat, M.: Effect of elevated temperature and pressures on the hydration and hardening of cement. – A principal paper. The VIth International Congress on the Chemistry of Cement. Moskow, Sept., 1974, II-8.
- Verbeck, G.–Foster, C. W.: Proc. Am. Soc. Test. Mater. (1950)
- Vinkeloe, R.: Temperaturverteilung in Beton als Folge der Abbindewärme des Zementes. – Betonstein Zeitung (1965), 687–697.
- Walz, K.–Bonzel, J.: Festigkeitsentwicklung verschiedener Zement bei niederer Temperatur. – Beton-technische Berichte, 1961.
- Weiss Gy.: A betonozás technológiája. – Közlekedési Kiadó, 1952.
- Weiss Gy.: Téli betonozás kérdései. – Felsőoktatási Jegyzetellátó V., 1953.

- Wesche, K.*: Baustoffe für tragende Bauteile 2. – Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1974.
- Wischers, G.–Manns, W.*: Ursachen für das Entsehen von Rissen in jungem Beton. – Betontechnische Berichte, 1973. Beton Verlag GmbH. 1974, 67–94.
- Zimonyi Gy.– Balázs Gy.*: Praktische Anwendungsmöglichkeit von Messungen im adiabatischen Kalorimeter. 3. Int. Bausteff und Gilikatlagung, Weimar, 1968. Sept. 23–27, 351–357 old.
- Zsigovics I.*: A péptelítettséghez szükséges pépigény meghatározása zúzott adalékanyag esetére. – BME Építőanyagok Tanszék kutatási jelentése, 1987.

A kiadásért felelős
az Akadémiai Kiadó Zrt. igazgatója
Szerkesztette: Sente László
Felelős szerkesztő: Tárnok Irén
Termékmenedzser: Hesz Margit
Borítóterv: Starkiss Stúdió
Tördelés, nyomdai előkészítés: Starkiss Kft.
A nyomdai munkálatokat az
EFO Nyomda Kft. végezte
Felelős vezető: Fonyódi Ottó
Százhalombatta, 2007
Kiadványszám: KMA5-140
Megjelent 35,39 (A/5) iv terjedelemben

■ A csaknem 150 éve használt beton napjaink legfontosabb építőanyaga, amely az elmúlt 50 évben igen nagy fejlődésen ment át. A hagyományos beton helyét egyre inkább a nagy szilárdságú és különleges betonok és betontechnológiák foglalják el.

A három kötetre tervezett könyv a szerző kutatási eredményeinek ismertetése, valamint az irodalomból vett kutatások és alkalmazási példák bemutatása által segítséget szeretne nyújtani a betontechnológusoknak a betonok és betontechnológiák tudatos alkalmazásához.

Az első kötet először a beton anyagaira, a friss és a megszilárdult betonra vonatkozó alapismereteket foglalja össze. Majd ismerteti többek között a vastag betonszerkezetek hidratációhő okozta egyenlőtlen felmelegedésének mechanizmusát, a repedések keletkezésének megelőzési módját, a beton gőzölésének szabályozását, a finomőrlésű cement szilárdulásának mechanizmusát, a beton szilárdságát hideg időben.

ISBN 978-963-05-8465-4



9 789630 584654

5250 Ft



Balázs György



KÜLÖNLEGES BETONOK ÉS BETONLÓGIAK I.