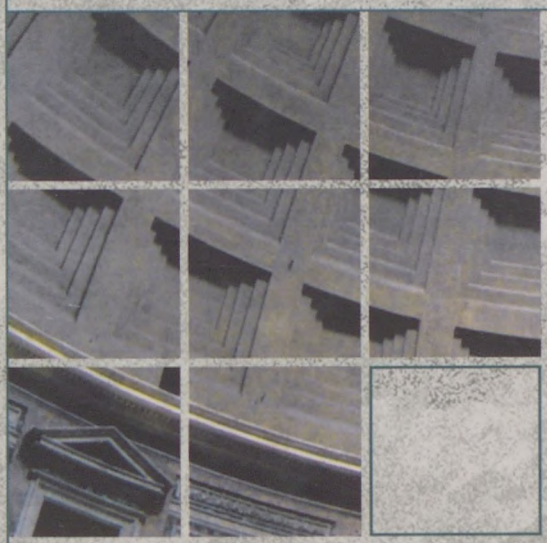
KÜLÖNLEGES BETONOK ÉS BETONTECHNOLÓGIÁK III.



Anyagok, szerkezet, hibamegelőzés

Balázs György

Akadémiai Kiadó

KÜLÖNLEGES BETONOK ÉS BETONTECHNOLÓGIÁK III.

KÜLÖNLEGES BETONOK ÉS BETONTECHNOLÓGIÁK III.

DR. BALÁZS GYÖRGY
okl. mérnök
prof. emeritus
a műszaki tudomány doktora
Széchenyi-díjas

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 8920 8

Kiadja az Akadémiai Kiadó,
az 1795-ben alapított
Magyar Könyvkiadók és Könyvterjesztők Egyesülésének tagja
1117 Budapest, Prielle Kornélia u. 19.
www.akademiaikiado.hu

Első magyar nyelvű kiadás: 2010

© Balázs György, 2010

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

17. Ferrocement 17
17.1. Fogalmak 17
17.2. A ferrocement története 17
17.3. A ferrocement alapanyagai 20
17.4. A készítés technológiája 22
17.5. A ferrocement mechanikai tulajdonságai 22
17.5.1. Nyomószilárdság 22
17.5.2. Húzószilárdság 23
17.5.3. Hajlítási viselkedés 25
17.6. Ferrocement betonjának tervezése 26
17.6.1. Bevezetés 26
17.6.2. A kutatás módszere 27
17.6.3. Az értekezés új tudományos eredményei 32
17.6.4. A kutatási eredmények hasznosítása 38

18. Szövetszerkezetes építési mód (dermesztett beton) 39
18.1. Fogalma 39
18.2. Történeti áttekintés 39
18.2.1. Szerkezet 39
18.2.2. A dermesztett betonanyagok és a velük készített szerkezetek 39
18.3. A szövetszerkezetes építés munkafázisai 44
18.4. A dermesztett vasbeton szerkezetek típusai és szerkesztési elvei 44
18.5. A dermesztett betonszerkezetek műszaki-gazdasági előnyei 47
18.6. Eredmények az anyagvizsgálat területén. 47
18.6.1. A betonösszetétel meghatározása 47
18.6.2. A szilárdsági jellemzők 50
18.6.3. Dermesztett betonok nyomószilárdságának alakulása hideg időben készített szerkezetek esetén 52

19. A tartósság követelménye és növelésének módszerei 54
19.1. A tartósság fogalma és gyakorlati értelmezése 54
19.2. Niederaußemi hűtőtorony 57
19.3. Az elsődleges megelőző védelem 59
19.3.1. A tartósság növelése szabályozással 59
19.3.2. A tartósság növelése tervezéssel (vasbeton) 59
19.3.3. A tartósság fokozása építéssel 59
19.3.3.1. Az anyagok megfelelő megválasztása 59
19.3.3.2. A tartósság fokozása tömör betonnal 60
19.3.3.3. A tömörség fokozása CSH-ot (kalcium-szilikát-hidrátot) létrehozó hidraulikus pótlékokkal 61
19.3.3.4. A tartósság növelése légbuborékos betonnal 61
19.3.4. Beton- és építéstechnológiai utasítás tartalma 61
19.3.5. Minőség-ellenőrzés 62
19.3.6. Üzemeltetés, fenntartás 64
19.4. Másodlagos megelőző védelem főbb részei 64
19.4.1. Általános szempontok 64
19.4.2. A betonfelület előkészítése, ellenőrzése 65
19.4.3. A felületvédelmi rendszerekkel szemben támasztott követelmények 65
19.4.4. Felületvédelmi rendszerek anyagai 66
19.5. Másodlagos megszüntető védelem 67
19.5.1. A hibás részek bontása 67
19.5.2. A felület kezelése 68
19.5.3. A javítás módszerei 68
19.6. Megállapítások 69

20. A légköri szennyeződés hatása a betonra 70
20.1. Bevezetés 70
20.2. A légszennyeződés mértéke 70
20.3. Korróziós károk tanulmányozása vasbeton szerkezeteken 76
20.3.1. Észak-magyarországi vasbeton szerkezetek 76
20.3.2. Veszprém környéki hidak vizsgálata 80
20.3.3. Elbontandó híd vizsgálata 85
20.4. A légköri szennyeződéssel kapcsolatos modellkísérletek 91
20.4.1. Pépkísérletek 91
20.4.2. Habarcskísérletek 94
20.4.3. Betonkísérletek 96
20.5. Összefoglalás 105
20.6. A kutatásból a tartósságra levont következtetés 107

21. Sugárvédő beton 108
21.1. A sugárvédő beton fogalma és alkalmazási területei 108
21.2. Sugárvédő betonok anyagai 109
21.3. A nehézbeton készítése 109
21.4. Színesfémsalak adalékanyagú nehézbeton 110
21.4.1. Bevezetés 110
21.4.2. A színesfémsalak adalékanyag tulajdonságai 110
21.4.3. A színesfémsalak nehézbeton tervezése 113
21.4.4. Néhány kísérleti eredmény 114
21.4.5. Összefoglalás 116
21.5. A Paksi Atomerőmű betonfalai betonjának tulajdonságai 117
21.5.1. Anyagjellemzők 117
21.5.1.1. A kísérlet terve 117
21.5.1.2. A kísérlet során vizsgált anyagjellemzők 120
21.5.1.3. A kísérletből levont következtetések. Számításba vett anyagjellemzők 121
21.6. Bauxit-adalékanyagú sugárvédő nehézbeton 131

22. A téli jégtelenítő sózás hatása az acélbetét korróziójára 134
22.1. Az acélbetét korróziója károsító anyagok betonba hatolása nélkül 134
22.1.1. Bevezetés 134
22.1.2. A korrózió elvi alapjai 134
22.1.3. Acélbetét korróziója 138
22.1.3.1. A korrózió mechanizmusa 138
22.1.3.2. A korrózió feltételei 140
22.1.3.3. Összefoglalás 144
22.2. Az acélbetét korróziója kloridok hatására 145
22.2.1. Bevezetés 145
22.2.2. Kloridionok hatása az acélok korróziójára 145
22.2.3. Kloridbehatolás a betonba 152
22.2.3.1. A betonalkotók szerepe 153
22.2.3.2. A kloridhatás módja közúti hídon 163
22.2.3.3. A kloridbehatolás egyéb esetei 165
22.3. A repedések hatása az acélkorrózióra 171
22.3.1. A repedések hatása a kísérletek szerint 171
22.3.2. Ajánlások a betonfedésre, a megengedett repedésszélességre 175
22.3.3. Összefoglalás 176
22.4. A korróziót kiváltó kritikus kloridtartalom 183
22.4.1. A korróziót kiváltó kritikus kloridtartalom fogalma 183
22.4.2. A vizsgálati módszerek és eredményeik 185

22.5. A beton kloridion-megkötő képessége 188
22.5.1. A kloridkötésről az irodalom alapján 188
22.5.2. A C_3A kloridion-megkötő képessége (1. kísérlet) 191
22.5.3. A C_3A kloridion-megkötő képessége (2. kísérlet) 193
22.5.4. A kalcium-aluminát-ferrit klinkerásványok kloridion-megkötő képessége 194
22.5.5. A cementek kloridion-megkötő képességének vizsgálata ... 197
22.6. Az acélkorrózió veszélye gőzölt betonban 198
22.6.1. Korábbi korróziós kísérletek 198
22.6.1.1. Laboratóriumi kísérletek 198
22.6.2. Kísérletek feszített betonhasábokon 206
22.6.3. Kísérletek feszített vasbeton keresztaljakkal 208
22.6.4. A kloridkötéssel kapcsolatos legújabb kísérleteink 208
22.6.4.1. A kísérlet leírása 208
22.6.4.2. A sókezelt C_3A és C_4AF hidratációja különböző összetétel és szilárdítás esetén 211
22.6.4.3. A cementek kloridion-megkötő képessége 215
22.6.5. Összefoglalás 217

23. Vízzáró beton 219
23.1. Fogalma és a vízzáró beton felhasználási területe 219
23.2. A vízzáró beton anyagai 220
23.3. Beton- és építéstechnológia 222
23.4. A vízzárás biztosítása vasbetonnal a Lurdy-ház alapozásánál 224
23.4.1. Bevezetés 225
23.4.2. Beton- és építéstechnológiai utasítás főbb elemei 225
23.4.2.1. A kiindulási adatok 225
23.4.2.2. Az alapanyagokra vonatkozó követelmények 226
23.4.2.3. A beton összetétele 227
23.4.2.4. Az eltarthatóság vizsgálatára javasolt módszerek 230
23.4.3. A betonozás 230
23.4.4. A minőség-ellenőrzés 232
23.4.4.1. A helyszíni vizsgálatok 232
23.4.4.2. A helyszíni vizsgálattal kapcsolatos értékelés 234
23.4.4.3. A laboratóriumi vizsgálatok 235

24. Könnyűbeton 238
24.1. Fogalma, osztályozása 238
24.2. Könnyűbeton adalékanyagai 240

24.2.1. Könnyű-adalékanyagos könnyűbetonok természetes könnyű adalékanyaga a vulkáni tufa, a habkő és a lávasalak 241
24.2.2. Könnyű-adalékanyagos könnyűbetonok mesterséges könnyű adalékanyagai: a téglazúzalék, a kazánsalak, a habosított kohósalak, a pernyekavics, a keramzit és a habüveg 241
24.2.3. Hőszigetelő könnyűbetonok adalékanyagai: duzzasztott perlit, fagyapotlemez, polisztirolgyöngy 243
24.3. Rövid történeti áttekintés 245
24.3.1. A könnyűbeton története általában 245
24.4. A könnyűbeton hazai felhasználása 250
24.4.1. A No-fines beton 250
24.4.1.1. A No-fines rendszer 250
24.4.1.2. No-fines beton 250
24.4.2. Kézi falazóelemek 252
24.4.2.1. Könnyű adalékanyagos falazóelemek 252
24.4.2.2. A kazincbarcikai gázszilikát 254
24.4.2.3. Gázbeton – pórusbeton 256
24.4.2.4. Habcement 263
24.4.2.5. Hőszigetelt kohóhabsalak falazóblokk rendszer ... 264
24.4.2.6. A HABISOL kézi falazóelem 266
24.4.3. Monolitbeton kohósalak adalékanyaggal 266
24.4.3.1. Kohóhabsalakból öntött lakóházak 266
24.4.3.2. A budafoki M1 jelű kohósalak beton kísérleti lakóépület építése csúszózsaluzatban 270
24.5. Polisztirolbeton 270
24.5.1. Alapismeretek 270
24.5.2. Kísérleteink 272
24.5.3. A kísérleti eredmények és rövid értékelésük 273
24.5.4. A polisztirolbeton zsugorodása 277
24.5.5. A polisztirolbeton hazai alkalmazása 278
24.6. Habüveg adalékanyagú könnyűbetonok 286
24.6.1. A habüveg adalékanyag 286
24.6.2. Habüveg adalékanyagú könnyűbetonok 288
24.6.2.1. Az értekezés célkitűzései 288
24.6.2.2. A kutatás módszere 289
24.6.2.3. Az értekezés új tudományos eredményei 291
24.6.2.4. Az értekezés eredményeinek hasznosítási lehetőségei 298
24.7. Könnyű adalékanyagú betonok összetételének tervezése 298

24.7.1. A könnyű adalékanyag legfontosabb tulajdonságai 298
24.7.2. A beton tervezése a szilárdság alapján 299
24.7.3. Hőszigetelő és teherhordó könnyűbetonok összetételének tervezése 302
24.7.4. Hőszigetelő könnyűbetonok tervezése 306

25. Kopásálló beton 307
25.1. Fogalma. Követelmények 307
25.2. A beton kopásállóságának a vizsgálata 308
25.2.1. Böhme-rendszerű koptatóberendezés 308
25.2.2. Duna-módszer 310
25.3. A beton alkotóinak hatása a kopásállóságra 310
25.3.1. A betonösszetétel hatása a beton kopásállóságára 311
25.3.2. A vizsgálat 311
25.3.2.1. A felhasznált anyagok, a vizsgálat módszere 311
25.3.2.2. A vizsgálatok eredményeinek értékelése 316
25.3.3. Kopásálló vízépítési beton 323
25.3.3.1. Bevezetés 323
25.3.3.2. A kísérlethez felhasznált anyagok 325
25.3.3.3. A kísérleti betonok összetétele és készítése 327
25.3.3.4. A kísérleti betonok 28 napos kockaszilárdsága 330
25.3.3.5. A beton kopásállósága 332
25.3.3.6. A beton fagyállósága 336
25.3.3.7. A kísérleti beton vízzárósága 338
25.3.3.8. A betonalkotók összeférhetősége 338
25.3.3.9. Összefoglalás 342

Irodalom 343

Előszó

2009-ben jelent meg *Különleges betonok és betontechnológiák* II. című könyvem. A harmadik kötetet 2010 februárjában fejeztem be. A kötetben lévő fejezeteket véletlen jelleggel választottam ki. A III. kötetben hat különleges beton szerepel: ferrocement, dermesztett beton, vízzáró beton, könnyűbeton, kopásálló beton és sugárvédő beton. Elvi kérdéseket tárgyal *A tartósság követelménye és növelésének módszerei* című fejezet. Eddig eléggé tisztázatlan korróziós kérdésekkel foglalkozik a következő két fejezet: *A légköri szennyeződés hatása a betonra* és *A téli jégtelenítő sózás hatása az acélbetét korróziójára.* A könyvet elsősorban az Építőanyagok Tanszék, ezen belül is elsősorban az általam irányított kutatásokra alapoztam. Emellett az irodalmi adatokra is tekintettel voltam.

Köszönetet mondok mindazoknak, akik ezekben a kutatásokban közreműködtek (oktatók, kutatók, technikusok, laboránsok), akiknek a fegyelmezett munkája a kutatási eredményekhez nélkülözhetetlen volt.

Bár az I. és II. kötetben ismertettem a jelöléseket, ezek közül az e könyvben szereplőket megismételtem.

A cementek ismertetésénél a kísérletezés időpontjában érvényes jelöléseket használtam. A könyv elején a cementek régi és új jelölését megismételtem.

A könyv kéziratát *Pásztory* Ferencné gépelte tükörbe. Az adminisztrációs munkát *Sánta* Gyuláné titkárnő és *Bakai* Krisztina hivatalsegéd végezte. Segítségüket köszönöm.

A kéziratot dr. *Kausay* Tibor PhD, a műszaki tudomány kandidátusa, tiszteleti egyetemi tanár lektorálta. Lelkiismeretes munkájával, tanácsaival sok segítséget nyújtott, különösen az új szabványok területén. Segítségét köszönöm.

Az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék vezetőjének, dr. *Balázs* L. Györgynek és a Tanszék dolgozóinak a könyv írásához nélkülözhetetlen nyugodt légkört köszönöm meg.

Mindenkit kértem, akinek a tanulmányát a könyvben felhasználtam, hogy véleményezzék az egyes fejezetek szövegét. Így dr. Nguyen Huu *Thanh,* a műszaki tudomány kandidátusa, a *Ferrocement,* dr. *Kászonyi* Gábor, a műszaki tudomány kandidátusa, a *Dermesztett beton, Csányi* Erika tudományos munkatárs a légszennyeződéssel, dr. *Kopecskó* Katalin egyetemi docens a kloridok okozta károsodással, dr. *Kovács* Károly főosztályvezető általában a korrózióval foglalkozó fejezeteket véleményezte és adott jó

tanácsokat. Dr. *Józsa* Zsuzsanna egyetemi docens, a *könnyűbeton* jelenleg legjobb szakértője az egész fejezetet véleményezte, és közreműködésével a pórusbeton-gyártás jelenlegi helyzetét feltárta, és röviden megfogalmazta. Dr. *Nemes* Rita egyetemi adjunktus a *Könnyűbeton* című fejezetből a doktori értekezésével foglalkozó részt véleményezte.

A habcement és polisztirolbeton jelenlegi gyártásáról *Sántha* Béla főmérnök és *Spránitz* Ferenc adott kiegészítő anyagot a BauMix Kft. részéről.

A pórusbeton gyártására vonatkozó jelenlegi ismereteket *Váradi* György technológiavezető ismertette, az alkalmazástechnikára pedig *Szabó* Antal adott tájékoztatást a XELLA Magyarország YTONG Falazóelemgyár részéről.

Köszönöm kedves feleségemnek, hogy munkámat mindenben segítette. Nélkülözhetetlen volt az, hogy szöveget diktálhattam akkor, amikor én olvashatóan írni nem tudtam.

Mindnyájuk segítségét nagyon köszönöm.

A kötet szép kiállítása az Akadémiai Kiadó érdeme. Megköszönöm *Tárnok* Irén szerkesztőnek, a Kiadó és a Nyomda munkatársainak fegyelmezett közreműködését.

Kérek mindenkit, hogy észrevételeiket – javaslataikkal együtt – hozzák tudomásomra. Segítségüket köszönöm.

A szerző

Jelölések

Az itt nem található jelöléseket előfordulási helyükön adjuk meg.

A cement kémiai és ásványi alkotói, cementhidratáció

Jel	Mennyiség	Mérték-egység
$C = CaO$	kalcium-oxid	m%
$S = SiO_2$	szilícium-dioxid	m%
$A = Al_2O_3$	alumínium-oxid	m%
$F = Fe_2O_3$	vas-oxid	m%
$M = MgO$	magnézium-oxid	m%
$Cs = CaSO_4 \cdot 2H_2O$	gipszkő (amit általában gipsznek neveznek)	m%
$H = H_2O$	víz	m%
$C_3S = 3CaO \cdot SiO_2$	trikalcium-szilikát	m%
$\beta C_2S = 2CaO \cdot SiO_2$	béta-dikalcium-szilikát	m%
$C_3A = 3CaO \cdot Al_2O_3$	trikalcium-aluminát	m%
$C_4AF = 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	tetrakalcium-aluminát-ferrit	m%
$CH = Ca(OH)_2$	kalcium-hidroxid	m%
$MH = Mg(OH)_2$	magnézium-hidroxid	m%
CSH	kalcium-szilikát-hidrát	m%
$E = C_3A \cdot 3Cs \cdot H_{32}$, ill. $C_3AF \cdot 3Cs \cdot H_{32}$	triszulfo-aluminát-hidrát = ettringit	m%
MS, ill. $FMS = C_3A \cdot Cs \cdot H_{12}$, ill. $C_3AF \cdot Cs \cdot H_{12}$	monoszulfo-aluminát (ferrit)-hidrát = monoszulfát	m%
$T = C_3A \cdot 3CaCl_2 \cdot H_{30}$	trikloro-aluminát-hidrát	m%
$F = C_3A \cdot CaCl_2 \cdot H_{10}$	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 neveztünk és SO_3 (m%) = $6{,}08 \cdot 10^{-5} \cdot C_3A$ (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 ∅150/300 mm hengeren vizsgálva	MPa
$f_{ci,\,cyl}$	a beton nyomószilárdság egyedi értéke ∅150/300 mm-es hengeren vizsgálva	MPa
$f_{cm,\,cyl}$	a nyomószilárdság előírt átlagértéke ∅150/300 mm-es hengeren vizsgálva	MPa
$f_{cm,\,cyl,\,test}$	a nyomószilárdság tapasztalati átlagértéke ∅150/300 mm-es hengeren vizsgálva	MPa
$f_{ck,\,cyl}$	a nyomószilárdság előírt jellemző értéke ∅150/300 mm-es hengeren vizsgálva	MPa
$f_{ck,\,cyl,\,test}$	a nyomószilárdság tapasztalati jellemző értéke ∅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 ∅150/150 mm méretű hengeren vizsgálva	MPa
$f_{tm,\,test}$	a beton hasító–húzó szilárdságának tapasztalati átlagértéke ∅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	‰
$\varepsilon_{c,l}(t)$	a beton lassú alakváltozása t időpontban	‰
$\varphi(t) = \frac{\varepsilon_{c,l}(t)}{\varepsilon_{el}}$	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
$E_{id} = \frac{E_o}{1+\varphi}$	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/m³
m_w, m_c, m_h	a víz, a cement, ill. a homok tömege	kg/m³
$m\%$	az anyag tömegére vonatkoztatott eredmény	
$x = \frac{m_w}{m_c}$	víz–cement tényező	
x_o	redukált víz–cement tényező	
ρ	sűrűség	kg/m³
ρ_t	testsűrűség	kg/m³
V	térfogat	ℓ, m³
$V\%$	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, m³
V_p	pépmennyiség	ℓ, m³
$V_{p,0}$	péptelítettséghez tartozó pépmennyiség	ℓ, m³
A	*Blaine* szerinti fajlagos felület (alsó indexben a kötőanyag, pl. A_c = cement fajlagos felülete	cm²/g
d_{max}, D	legnagyobb névleges adalékszemcse-méret	mm
m_A	Az *Abrams* 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%

17. Ferrocement

[*Balázs* (1994)]

17.1. Fogalmak

A mai szabványok szerint a megszerkesztett vasbeton lemez, héjlemez 12 cm-nél vékonyabb nem lehet, ha feltételezzük a hálós vasalást és az előírt betonfedést, amely napjainkban az XC4 környezeti osztályban 40 mm. Héjszerkezetekben statikailag gyakran kisebb vastagság is elég lenne. A vastagság csökkentését csak a ferrocement és a szálerősítés teszi lehetővé.

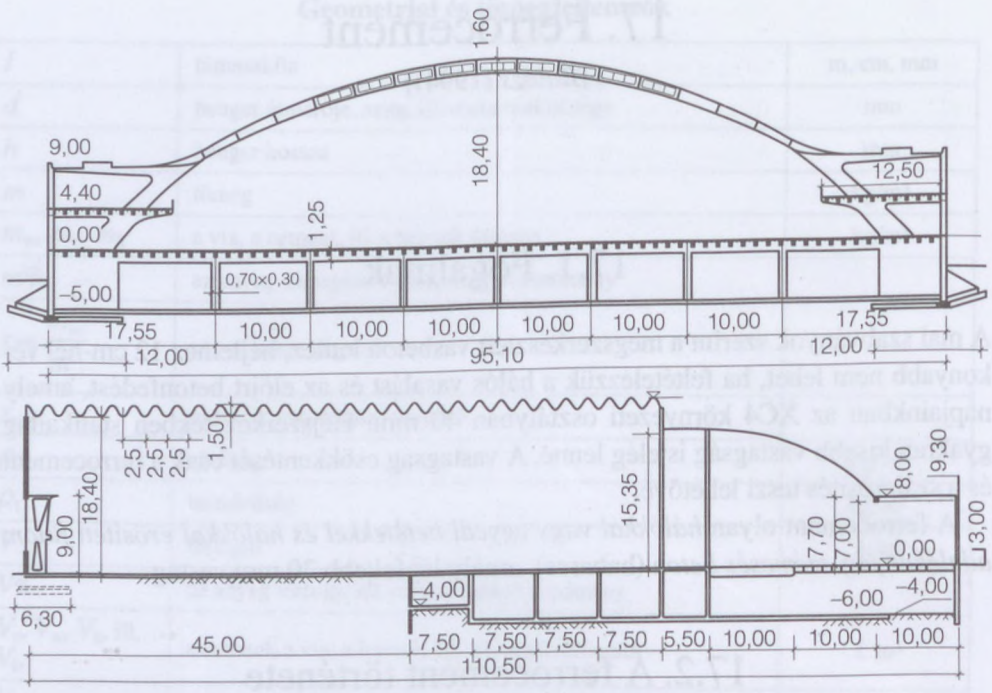
A ferrocement olyan *hálókkal vagy egyedi betétekkel és hálókkal erősített finom adalékanyag-szemcsés beton* (habarcs), amely legfeljebb 30 mm vastag.

17.2. A ferrocement története

A *Monier*-virágcserép és a *Lambot*-csónak tekinthető a ferrocement ősének [*Thanh* (1987)]. A ferrocement igazi apostola *Nervi,* híres olasz építész volt. *Bartolival* 1945-ben az Irene nevű 165 t vízkiszorítású vitorláshajót tervezte és építette. *Nervi* a ferrocementből építőipari szerkezetet 1946-ban tervezett, egy raktárat Rómában, amelynek fal- és tetőelemeit egyaránt 3 cm vastag előregyártott ferrocementelemekből készítették [*Náday–Weisz* (1964); *Desideri–Nervi–Positano* (1983)].

A II. világháború után *Nervi* megalkotta híres építészeti alkotásait, amelyek szerkezeti megoldásaikkal és méreteikkel tűnnek ki. Ilyenek: magasházai (Centro Pirelli, Milánó), gyárépületei (Castiera Burgo, Mantova), nyitott stadionjai (Stadio Flaminio, Róma), hídszerkezetei (Ponte del Risorgimento, Verona) [*Thanh–Balázs L.* (1990)]. Közülük a leghíresebb az 1949-ben épült, 91 m fesztávolságú torinói kiállítási csarnok (*17.1. ábra*).

E szerkezetek merészségét és *Nervi* zsenialitását talán az érzékelteti legjobban, hogy építményei m^2-re vetített önsúlya az ókor és a középkor híres kupoláihoz képest (legnagyobb támaszközű a római Pantheon volt, amelynek 42 m átmérőjű, félgömb alakú kupoláját Kr. e. 27-ben építették) 25 kN/m^2-ről 2 kN/m^2-re csökkent. Természetesen sem hajlított síklemezt, sem lemezből hajlított dongahéjat készíteni nem lehetett. *Nervi* a vékony lemezek hajlító merevségét a hullám vagy a trapéz keresztmetszetű szerkezetekkel érte el. A vízzáróssággal nem volt baj, mert a cementtartalom 700–1000 kg/m^3 volt [*Náday–Weisz* (1964)]. *Nervi* alkalmazta először a ferrocementet többször felhasználható zsaluzatnak.



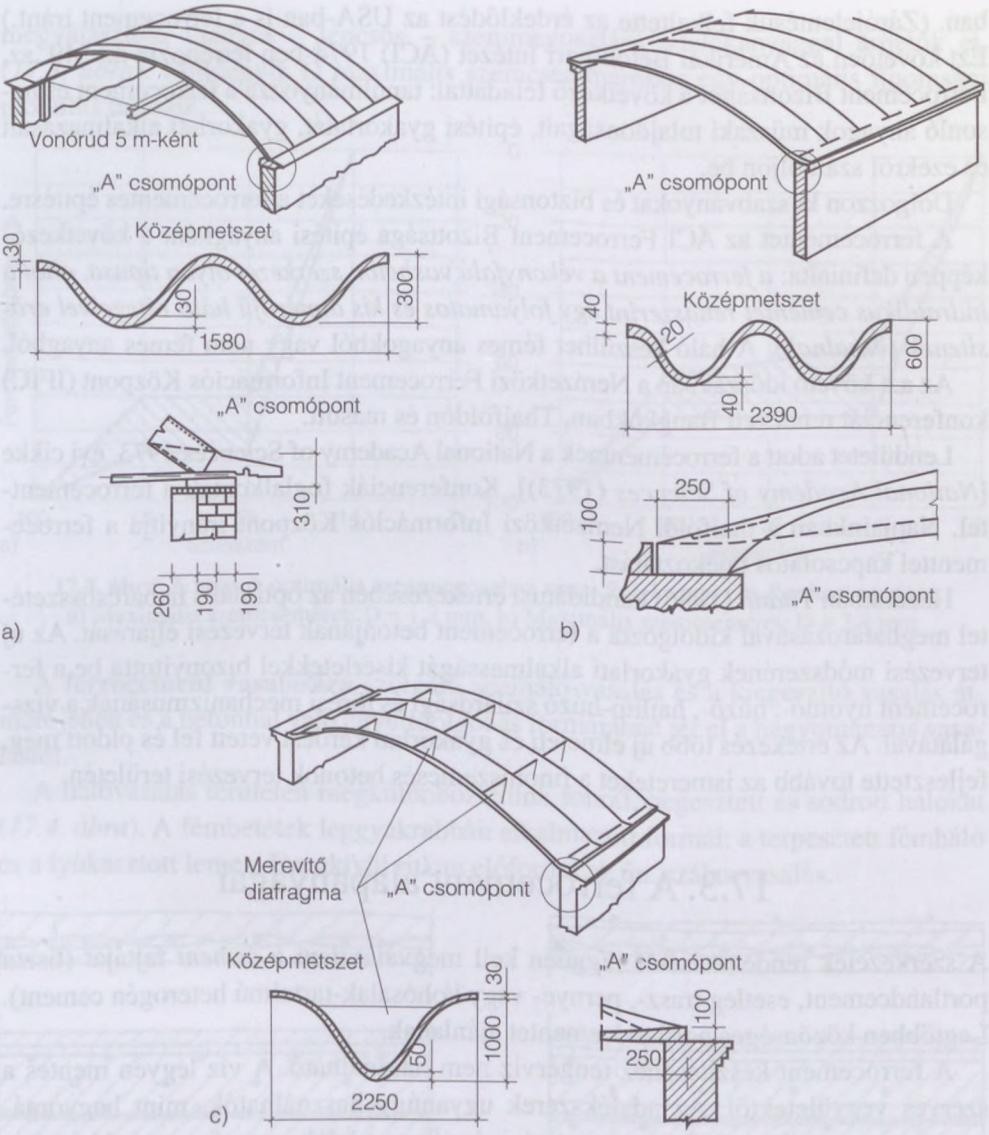
17.1. ábra. Nervi torinói kiállítási csarnoka [*Desideri–Nervi–Positano* (1983)]

Mégsem terjedt el azonban úgy, ahogy várni lehetett volna, mivel megfelelő hálóvasalást és igen gondos technológiát kívánt, ám több országban kísérleteztek vele.

A Szovjetunióban 1957-ben építették az első csarnoktetőt. Kidolgozták a számítási anyagjellemzőket. Így például a névleges szilárdság háromnegyedét tekintették határfeszültségnek. MPa habarcsszilárdság és 2/cm felületi tényező (cm^2 acélfelület: cm^3 ferrocement-térfogat) esetén ez a *17.1 táblázat* szerinti. A leningrádi 105. sz. Trösztnél kétféle típus-tetőszerkezetet dolgoztak ki. A vonóvasas ívtartót 12 és 18 cm támaszközre (*17.2a) ábra*) és a gerendajellegű elemeket 6–18 m támaszközre (*17.2b) és c) ábra*) [*Náday–Weisz* (1964)].

17.1. táblázat. Számítási anyagjellemzők

Igénybevétel	Szabványos szilárdság MPa	Határfeszültség, MPa	Rugalmassági modulus MPa
Húzás	6	4,5	5 000
Nyomás	24	18	20 000
Hajlításból származó húzás	12	9	5 000
Hajlításból származó nyomás	24	19,5	15 000
Hajlításból származó nyírás	6	4,5	–
Tiszta nyírás	9	6	–



17.2. ábra. Ferrocement felhasználása: a) vonóvasas kéthullámú ívszerkezet ferrocementből; b) gerenda jellegű kéttámaszú, kéthullámú tetőfedő elemek ferrocementből; c) gerenda jellegű, kéttámaszú, egyhullámú tetőfedő elemek ferrocementből [*Náday–Weisz* (1964)]

A ferrocementet a 1960-as években [*Sabnis–Naaman* (1978)] kezdték használni a fejlett országokban (Ausztráliában, Angliában, Új-Zélandban). Ennek ellenére a ferrocement a szegényebb országok építőanyaga maradt. Ugyanis alapvető alapanyagai általánosan rendelkezésre álltak és az építése is kis szakértelmet igényelt.

1972-ben az USA Országos Tudományos Akadémia létrehozott egy bizottságot abból a célból, hogy tanulmányozza a ferrocement használatát a fejlődő országok-

ban. (Zárójelentésük felkeltette az érdeklődést az USA-ban is a ferrocement iránt.) Ezt követően az Amerikai Betonipari Intézet (ACI) 1974-ben létrehozta az 549. sz. Ferrocement Bizottságot a következő feladattal: tanulmányozza a ferrocement és hasonló anyagok műszaki tulajdonságait, építési gyakorlatát, gyakorlati alkalmazásait és ezekről számoljon be.

Dolgozzon ki szabványokat és biztonsági intézkedéseket a ferrocementes építésre.

A ferrocementet az ACI Ferrocement Bizottsága építési anyagként a következőképpen definiálta: *a ferrocement a vékonyfalú vasbeton szerkezet olyan típusa, ahol a hidraulikus cementet rendszerint egy folyamatos és kis átmérőjű háló rétegeivel erősítenek (vasalnak).* A háló készülhet fémes anyagokból vagy nem fémes anyagból.

Az azt követő időszakban a Nemzetközi Ferrocement Információs Központ (IFIC) konferenciát rendezett Bangkokban, Thaiföldön és másutt.

Lendületet adott a ferrocementnek a National Academy of Sciences 1973. évi cikke [*National Academy of Sciences* (1973)]. Konferenciák foglalkoztak a ferrocementtel. Napjainkban a thaiföldi Nemzetközi Információs Központ irányítja a ferrocementtel kapcsolatos tájékoztatást.

Hazánkban *Thanh* (1986) kandidátusi értekezésében az optimális habarcsösszetétel meghatározásával kidolgozta a ferrocement betonjának tervezési eljárását. Az új tervezési módszerének gyakorlati alkalmasságát kísérletekkel bizonyította be a ferrocement nyomó-, húzó-, hajlító-húzó szilárdsági és törési mechanizmusának a vizsgálatával. Az értekezés több új elméleti és gyakorlati kérdést vetett fel és oldott meg, fejlesztette tovább az ismereteket a finomszemcsés betonok tervezési területén.

17.3. A ferrocement alapanyagai

A szerkezetek rendeltetésétől függően kell megválasztani a *cement* fajtáját (tiszta portlandcement, esetleg trasz-, pernye- vagy kohósalak-tartalmú heterogén cement). Legtöbben közönséges portlandcementet ajánlanak.

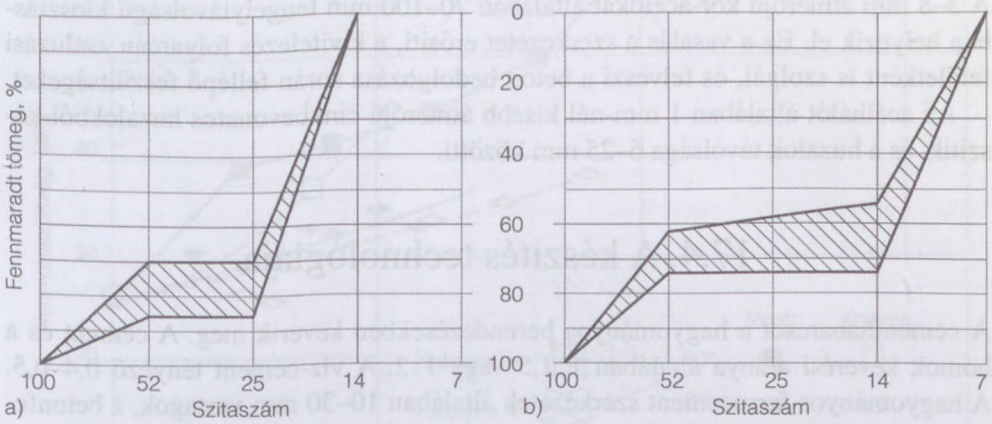
A ferrocement készítéséhez tengervíz nem használható. A víz legyen mentes a szerves vegyületektől. Az adalékszerek ugyanúgy használhatók, mint hagyományos beton esetében. A ferrocement vízigényét az adalékanyag legnagyobb szemcsenagysága, finomsági modulusa, a fajlagos felülete és a szemmegoszlás jellege határozza meg.

Világszerte sok kutató foglalkozott az **adalékanyag** optimális összetételének a tervezésével, a vízigényt és a bedolgozhatóságot szem előtt tartva.

Általában egyetértenek abban, hogy a legnagyobb szemnagyság ne legyen nagyobb 4,0 milliméternél, vagy a ferrocement elemek vastagságának, illetve az acélháló lyukméretének egyharmadánál.

Voznyeszenszkij (1963), *Raichvanger* és *Raphael* kutatási eredményei szerint a ferrocement szerkezetek viszonylag nagy cementadagolással (500–800 kg/m^3), jól

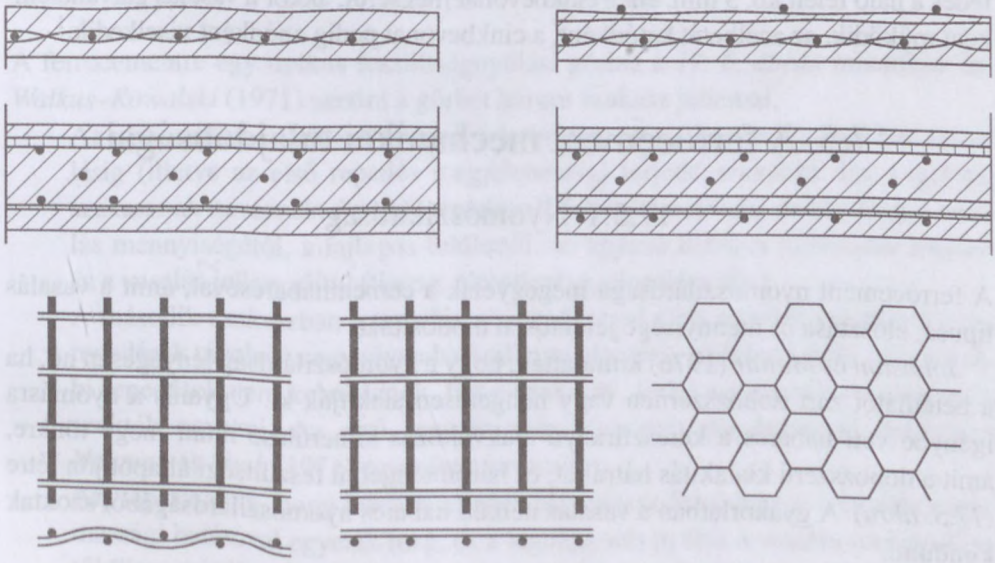
megválasztott, hiányos – lépcsős – szemmegoszlású adalékanyaggal érhetők el, (*17.3. ábra*). Mindegyik D maximális szemcseátmérőhöz egy optimális finomsági modulus tartozik.



17.3. ábra. A homok optimális szemmegoszlási zónái *Raichvanger* és *Raphael* szerint.
a) Maximális szemcseméret: D = 1,2 mm, b) Maximális szemcseméret: D = 2,4 mm

A **ferrocement vasalására** szolgáló acélháló-vasalás és a kiegészítő vasalás átmérőjében és a betonnal való együttdolgozás formájában tér el a hagyományos vasalástól.

A hálóvasalás területén megkülönböztetünk fonott, hegesztett és sodrott hálókat (*17.4. ábra*). A fémbetétek leggyakrabban alkalmazott formái: a terpesztett fémháló és a lyukasztott lemez. Ezenkívül ritkán előfordul az ún. szálas vasalás.



17.4. ábra. A ferrocement-vasalás [*Thanh* (1987)]

A fémbetéteken kívül használhatnak növényi rostokat (például nád, bambusz) és üvegszálat vagy más szervetlen szálat.

A ferrocement vasalásának másik típusa a rögzített vagy hegesztett hálós vasalás. A 3–8 mm átmérőjű kor-acélokat általában 70–100 mm tengelytávolságú kiosztásban helyezik el. Ez a vasalás a szerkezetet erősíti, a kivitelezés folyamán zsaluzási felületként is szolgál, és felveszi a beton bedolgozása során fellépő feszültségeket.

Az acélhálót általában 1 mm-nél kisebb átmérőjű cinkbevonatos huzalokból készítik, és a huzalok távolsága 6–25 mm közötti.

17.4. A készítés technológiája

A cementhabarcsot a hagyományos berendezésekben keverik meg. A cement és a homok keverési aránya általában 1:1,5 vagy 1:2. A víz-cement tényező 0,4–0,5. A hagyományos ferrocement szerkezetek általában 10–30 mm vastagok, a betonfedés csak 3–4 mm.

A ferrocement bedolgozása a legfontosabb művelet. Rendszerint kézi erővel dolgozzák be, de lövelléssel vagy kézi felhordás és lövellés kombinációjával igen tömör szerkezet készíthető. Készítenek belőle csónakokat, hajókat, víztartályokat, tetőfedő elemeket, héjakat stb.

A jól elkészített ferrocement vízzárónak tekinthető. A nagy cementtartalom miatt zsugorodásra hajlamos és repedésérzékeny, de éppen az az erősítő vasalás szerepe, hogy a repedésveszélyt csökkentse, illetve kiküszöbölje.

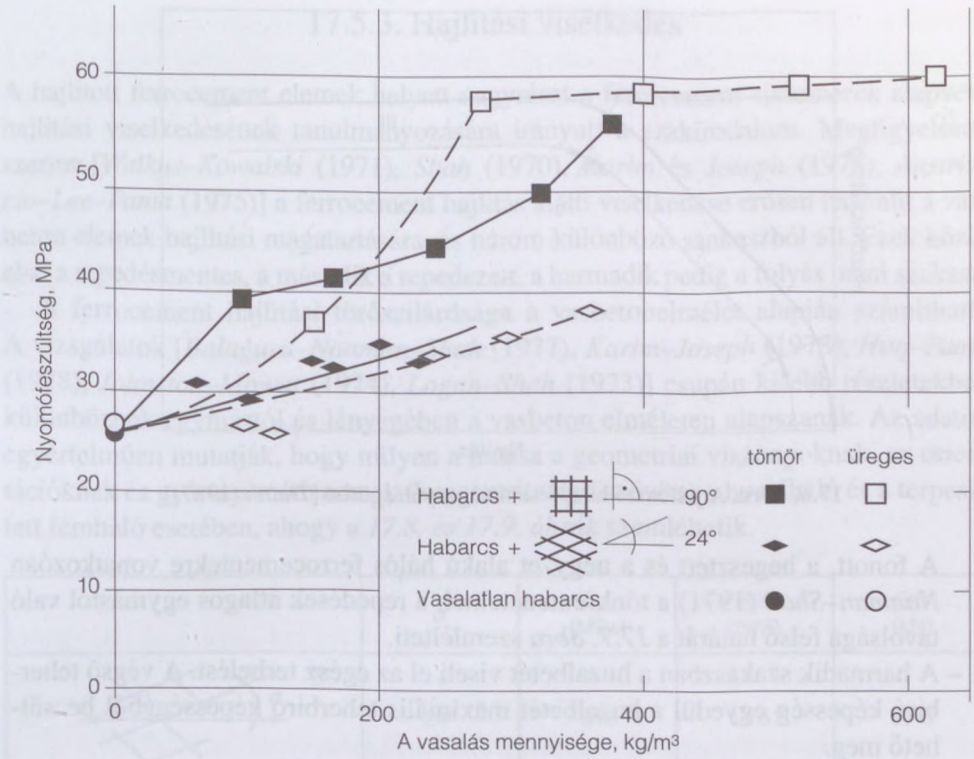
A nagy tömörségre a korrózió elleni védelem miatt van szükség. Ugyanis a betonfedés a háló felett kb. 3 mm. Ha a cinkbevonat megsérül, akkor a vasalás galvánelemként működik, az acélbetét katódként, a cinkbevonat pedig anódként viselkedik.

17.5. A ferrocement mechanikai tulajdonságai

17.5.1. Nyomószilárdság

A ferrocement nyomószilárdsága megegyezik a cementhabarcséval, amit a vasalás típusa, elosztása és mennyisége jelentősen módosíthat.

Johnston és *Mattar* (1976) kimutatták, hogy a nyomószilárdság lényegesen nő, ha a betéthálót zárt dobozszerűen vagy hengeresen alakítják ki. Ugyanis a nyomásra igénybe vett habarcs a keresztirányú alakváltozás kimerülése miatt megy tönkre, amit a dobozszerű kialakítás hátráltat, és háromtengelyű feszültségi állapot jön létre (*17.5. ábra*). A gyakorlatban a vasalás nélküli habarcs nyomószilárdságából szoktak kiindulni.



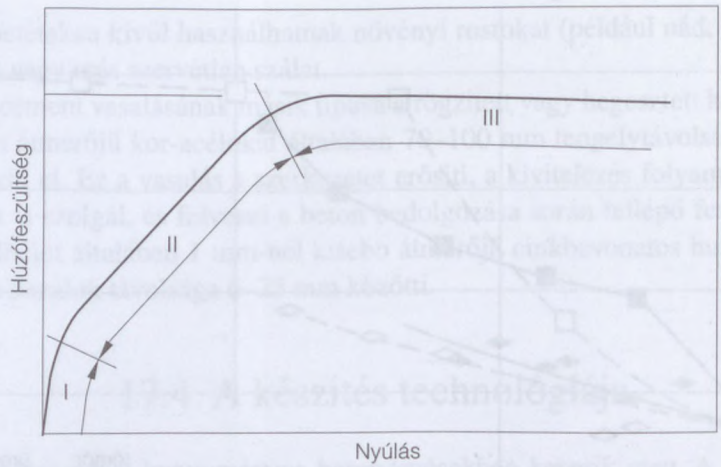
17.5. ábra. Nyomószilárdság a vasalás mennyisége függvényében [*Thanh* (1987)]

17.5.2. Húzószilárdság

A ferrocementre egy tipikus feszültségnyúlási görbét a *17. 6. ábrán* mutattunk be. *Walkus–Kowalski* (1971) szerint a görbét három szakasz jellemzi.

– Az *első szakasz* a ferrocementnek a terhelésmentes állapottól a repedési terhelésig (illetve az első repedés megjelenéséig) terjedő szakasza. Ezt rugalmas szakasznak nevezzük. Az első repedésnél fellépő feszültség értéke függ a vasalás mennyiségétől, a fajlagos felülettől, az ágyazó habarcs húzószilárdságától és a vasalás jellemzőitől (típusa, elrendezése, eloszlása stb.)

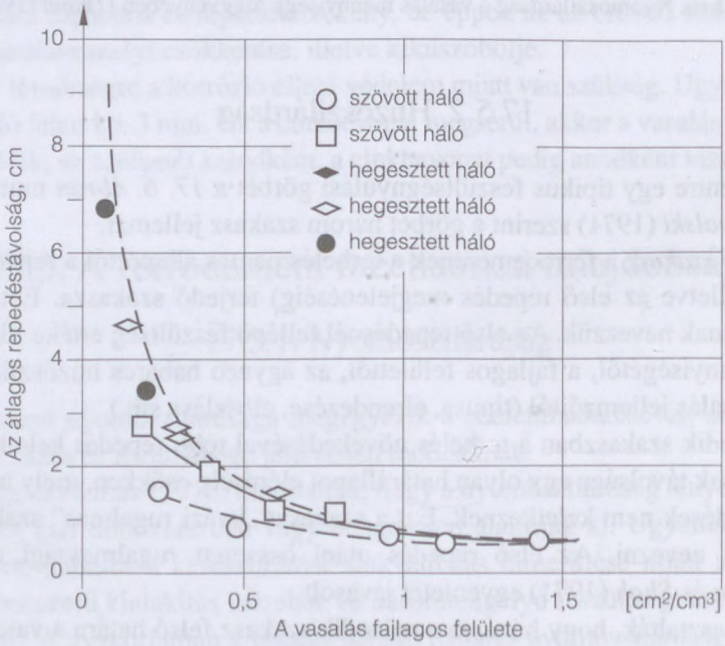
– A második szakaszban a terhelés növekedésével több repedés keletkezik, és a repedések távolsága egy olyan határállapot eléréséig csökken, mely után további repedések nem keletkeznek. Ezt a szakaszt „kvázi rugalmas" szakasznak is szokták nevezni. Az első repedés utáni összetett rugalmassági modulusra *Naaman* és *Shah* (1971) egyenletet javasolt.
Azt tapasztalták, hogy húzásra a második szakasz felső határa a vasalás rugalmassági határával egyezik meg, és a legnagyobb nyúlás a vasalás mennyiségétől függ; minél nagyobb a vasalás mennyisége, annál nagyobb a megnyúlás.



17.6. ábra. A jellemző húzófeszültség-nyúlásgörbe [*Thanh* (1987)]

A fonott, a hegesztett és a négyzet alakú hálós ferrocementekre vonatkozóan *Naaman–Shah* (1971) a tönkremenetelnél, a repedések átlagos egymástól való távolsága felső határát a *17.7. ábra* szemlélteti.

– A harmadik szakaszban a huzalbetét viseli el az egész terhelést. A végső teherbíró képesség egyedül a huzalbetét maximális teherbíró képességéből becsülhető meg.

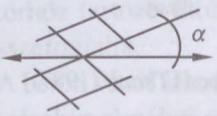
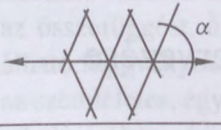
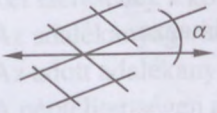
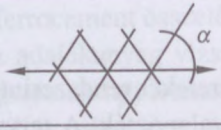
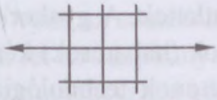
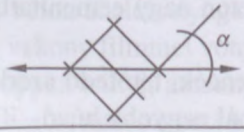


17.7. ábra. Az átlagos repedéstávolság a vasalás fajlagos felülete függvényében [*Thanh* (1987)]

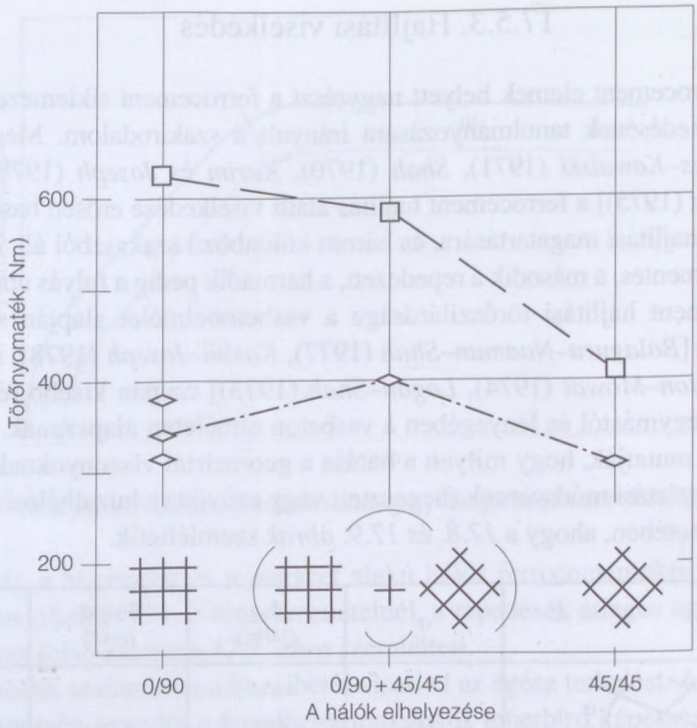
17.5.3. Hajlítási viselkedés

A hajlított ferrocement elemek helyett nagyrészt a ferrocement síklemezek alapvető hajlítási viselkedésének tanulmányozására irányult a szakirodalom. Megfigyelések szerint [*Walkus–Kowalski* (1971), *Shah* (1970), *Karim* és *Joseph* (1978), *Austriacio–Lee–Pama* (1975)] a ferrocement hajlítás alatti viselkedése erősen hasonlít a vasbeton elemek hajlítási magatartására, és három különböző szakaszból áll. Ezek közül első a repedésmentes, a második a repedezett, a harmadik pedig a folyás utáni szakasz.

A ferrocement hajlítási törőszilárdsága a vasbetonelmélet alapján számítható. A vizsgálatok [*Balaguru–Naaman–Shah* (1977), *Karim–Joseph* (1978), *Huq–Pama* (1978), *Johnston–Mowat* (1974), *Logan–Shah* (1973)] csupán kisebb részletekben különböznek egymástól és lényegében a vasbeton elméleten alapszanak. Az adatok egyértelműen mutatják, hogy milyen a hatása a geometriai viszonyoknak, az orientációknak és gyártási módszernek (hegesztett vagy szövött) a huzalháló és a terpesztett fémháló esetében, ahogy a *17.8. és 17.9. ábrák* szemléltetik.

	α	δ_{su} (MPa)	Felület (cm²)	Erő (kN)
	24°	618	1,761	57,3
	66°	618	0,142	5,4
	31°	391	0,980	93,0
	69°	391	0,342	8,0
	90°	410	0,768	35,8
	45°	410	0,768	18,8

17.8. ábra. A húzószilárdság a vasalás irányának a függvényében [*Thanh* (1987)]



17.9. ábra. A törőnyomaték a hálók elhelyezése függvényében [*Thanh* (1987)]

17.6. Ferrocement betonjának tervezése

[*Thanh* (1986)]

E fejezet *Thanh* (1986) kandidátusi értekezése téziseit tartalmazza.

17.6.1. Bevezetés

A ferrocement betonjának tervezésére vonatkozó szakismereteket rendszerint a hagyományos betonismeretre és a gyakorlati tapasztalatokra alapozták. A tervezésre vonatkozó eljárások mindmáig kezdetlegesek és kidolgozatlanok. A gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy homok adalékanyagú betonok (habarcsok) készítési technológiája sok vonatkozásban eltér a hagyományos betonok technológiájától. A legnagyobb eltérés az adalékanyag vízszükséglete, a beton nagy cementtartalma stb. terén tapasztalható.

A ferrocement felhasználási területei (hajóépítés, medencék, tetőfedő szerkezetek, silók, víztárolók stb.) többsége a hagyományos betonnál nagyobb húzó-, illetve hajlító-húzó szilárdságú, kellő tömörségű, vízzáró betont igényel.

A hagyományos betontervezési módszereket egy az egyben nem lehet alkalmazni a ferrocement betonjának összeállítására. Ugyanis, a ferrocementre alkalmas adalékanyag szemnagysága rendszerint homoktartományba esik, azaz a legnagyobb szemcseméret D = 4 mm, kivételes esetben D = 8 mm. Emiatt nő az adalékszemek fajlagos felülete, következésképpen több víz szükséges az adalékszemek benedvesítéséhez. A megfelelő bedolgozhatósághoz és végszilárdsághoz több cementre van szükség, 400–700 kg/m^3, ellenben a normál beton (D > 8 mm) esetén a cementadagolás 250–350 kg/m^3 között is elegendő.

A ferrocement tervezésének központi problémája az adalékanyag vízszükséglete, valamint a bedolgozhatóság, a cementadagolás és a szilárdság szempontjából optimálisnak vélt betonösszetételének a meghatározása. Ezek a problémák indokolták [*Thanh* (1986)] kutatómunkáját.

17.6.2. A kutatás módszere

1. *Elemezte* a beton tervezésével – főleg az adalékanyag finom részének fajlagos felületével – és a ferrocementtel kapcsolatos magyar és külföldi szakirodalmat. Az e témakörhöz tartozó főbb módszereket, javaslatokat és kutatási eredményeket röviden összefoglalta.

2. A beton vázát alkotó *adalékanyag vízszükségletének és hézagtérfogatának* meghatározásakor elméleti megfontolásokra és saját kísérleti adatokra támaszkodva kereste az összefüggést, úgy hogy egyúttal a tervezők, illetve felhasználók számára használható függvényeket, számítási formulákat, illetve táblázatokat adhasson meg, hogy az szemléletes, egyszerű és megbízható is legyen.

A cél eléréséhez a következő kérdéseket vetette fel és tisztázta:

- Az adalékanyag vízszükségletének meghatározása (w_a), m%.
- Az adott adalékanyag-keverék hézagtérfogatának meghatározása (V_p), dm^3/m^3.
- A péptelítettségen alapuló betontervezés finomszemcsés adalékanyagra. Azaz a ferrocement összetételének tervezése.

Az adalékanyag vízszükséglete az a vízmennyiség, amely elegendő az adalékanyagszemek felületének bevonásához egy vékony filmréteggel, és tömörítés során vízkiválás még nincs. Az adalékanyag vízszükségletének meghatározásához figyelembe vette az adalékanyag fajlagos (S) felület hatását. Egy analitikai összefüggést állított fel az adalékanyag *vízszükséglete* és a *fajlagos felület* nagysága között, kitérve a szemmegoszlási görbe folytonos vagy lépcsős jellegére.

A beton adalékanyaga szemcsés halmaz. A cementpép egy része a szemcsék felületét vékony filmmel vonja be, más része a szemcsék közötti hézagokat tölti ki. Ha a pép éppen annyi, amennyi az adalékanyag bevonásához és a hézagok kitöltéséhez szükséges, akkor a beton cementpéppel *telített*. Ha a cementpép ennél kevesebb, akkor a beton *telítetlen,* ha több, akkor *túltelített.*

A pépigény meghatározásához ismernünk kell a vegyes szemű adalékanyag-keverék hézagtérfogatát. *Thanh* a hézagtérfogat meghatározásához elméleti geometriai ismeretekből indul, és saját mérési eredményeit egy könnyen alkalmazható analitikai összefüggéssel dolgozta fel. A hézagtérfogat mérésére végzett kísérleti eredményeket egy ferde haranggörbe-sereggel regressziós összefüggés alakjában kereste. A függvényalak helyességét linearizáló módszerrel igazolta, és az állandókat a legkisebb négyzetek módszerével határozta meg. Néhány fontos és érdekes geometriai megállapítást ismertetett a függvény szélsőséges értékhatárok meghatározására.

Tétel: *Gömb alakú, azonos átmérőjű, szabályos elhelyezésű anyagok hézagtérfogata – a szemnagyságtól függetlenül – azonos.*

a) Első eset: Gömb alakú, azonos szemnagyságú anyag esetén, olyan elhelyezkedés mellett, hogy minden adalékgömbszem a körülírt kockában nyert elhelyezést:

$$V_p = 1 - \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{8r^3} = 1 - \frac{\pi}{6} = 1 - 0{,}52 = 0{,}48$$

b) Második eset: Gömb alakú, azonos szemnagyságú anyag esetén, olyan elhelyezkedés mellett, hogy négy egymást érintő adalékgömbszem középpontja egy szabályos tetraédert alkot (éleinek száma: 6):

$$V_p = 1 - \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{4\sqrt{2} \cdot r^3} = 1 - \frac{\pi\sqrt{2}}{6} = 1 - 0{,}74 = 0{,}26$$

c) Harmadik eset: Gömb alakú, azonos szemnagyságú anyag esetén, olyan elhelyezkedés mellett, hogy hat egymást érintő adalékgömbszem középpontja egy szabályos oktaédert alkot (éleinek száma:12):

$$V_p = 1 - \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{4\sqrt{2} \cdot r^3} = 1 - \frac{\pi\sqrt{2}}{6} = 1 - 0{,}74 = 0{,}26$$

d) Negyedik eset: Gömb alakú, azonos szemnagyságú anyag esetén, olyan elhelyezkedés mellett, hogy egy adalékgömbszem olyan tíz másik adalékgömbbel érintkezik, amelyeknek a szóban forgó gömb középpontjában átmenő, egymásra merőleges két síkban helyezkednek el a középpontjai:

$$V_p = 1 - \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{6r^3} = 1 - \frac{2\pi}{9} = 1 - 0{,}70 = 0{,}30$$

Ezek után a következő következtetéseket vonhatjuk le:

Az azonos szemnagyságú gömbök szabályos elhelyezkedés mellett az első esetnél lazább, a második és harmadik esetnél tömörebb elhelyezkedés nem alakulhat ki.

Vagyis az azonos szemeknél a hézagtérfogat felső határértéke $V_p = 0{,}48$-ra, az alsó határértéke $V_p = 0{,}26$-ra vehető fel. Azaz $260 \leq V_{pH} \leq 480$ dm^3/m^3.

Thanh kutatómunkája során a tömegállandóságig szárított adalékanyag szemmegoszlását az MSZ 4713/3 szabvány előírása szerint vizsgálta a 0,063–0,125–0,25–1–2–4 mm-es szitasoron. Különböző frakciókra osztályozta az adalékanyagot. Az osztályozott adalékanyag-frakciókból a kutatási céljának megfelelően 87 féle keveréket állított elő. A keverékekre kiszámolta az adalékanyag *Abrams–Popovics*-féle finomsági modulusát (m) és fajlagos felületét (S). Bevezette a

$$t = \frac{m}{\sqrt{S}}$$

ún. *finomsági tényezőt,* amely a finomsági modulusnak és fajlagos felület négyzetgyökének hányadosa. Ennek segítségével az adalékanyag hézagtérfogatának háromváltozós $V_p = V_p(m, S, D)$ függvényét egy kétváltozós $V_p = V_p(t, D)$ függvénnyé alakította át.

Egy keverékből 3 kg anyagot mért ki. Az adalékanyag legjobb tömörítéséhez kimért anyagot kényszerkeverőbe helyezte, és keverés közben a fenti képlet alapján meghatározott *mennyiségű vizet* adagolt hozzá. A vízzel megkevert anyagot 3 db 0,5 literes, a magassághoz közel egyenlő átmérőjű henger alakú edénybe dolgozta be. Az edényt 3 rétegben töltötte tele. Egyes réteg betöltése után éles élű, egyes vaskanállal 15-ször szétszórtan kézzel szurkálva tömörítette. A kézi bedolgozás után az edényt lefedve asztali vibrátorral 40 másodpercig dolgozta be, felesleges anyagot vasvonalzóval lehúzva, megmérte a minta testsűrűségét. Ezután az adalékanyag látszólagos hézagtartalma már meghatározható V_p(dm^3, m^3). A vizsgálat során 6 mérési sorozaton összesen 87 (t–V_p) értékpárt kapott. Egy értékpár rendszerint 3–6 mérési eredmény átlagát foglalja magába.

A homok fajlagos felületének (S) számításához a Palotás-féle módszert használta fel [*Palotás* (1952)].

A homok vízszükségletét leíró w_a–w_b (S) analitikai képletének paramétereit a legkisebb négyzetek módszerével határozta meg. A homokkeverék hézagtérfogatát kifejező $V_p = V_p(t)$ függvény paramétereinek meghatározásához az elméleti megfontolásokon kívül ún. kombinált illesztési módszert használt fel.

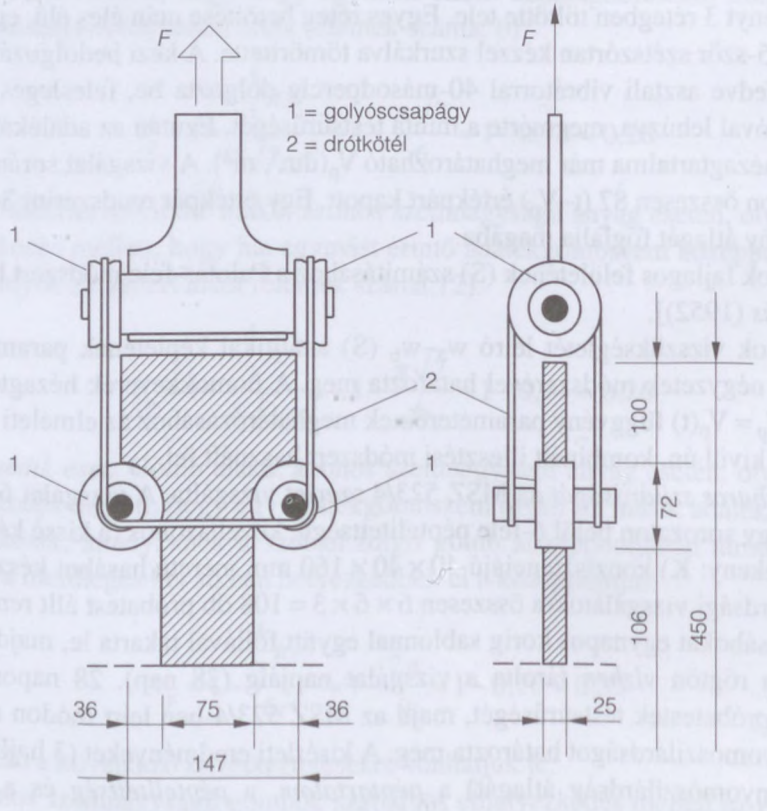
3. *A habarcs szilárdságát* az MSZ 523/4 szerint vizsgálta. A vizsgálat 6 sorozatból állt. Egy sorozaton belül 6-féle péptelítettségű, közel azonos (a kissé képlékeny: KK, képlékeny: K) konzisztenciájú $40 \times 40 \times 160$ mm méretű hasábot készített. Tehát a szilárdsági vizsgálatokra összesen $6 \times 6 \times 3 = 108$ db próbatest állt rendelkezésére. A hasábokat egynapos korig sablonnal együtt fóliával takarta le, majd a kizsaluzás után rögtön *vízben* tárolta a vizsgálat napjáig (28 nap). 28 napos korban először a próbatestek testsűrűségét, majd az MSZ 523/4-ben leírt módon a hajlító-húzó és nyomószilárdságot határozta meg. A kísérleti eredményeket (3 hajlító-húzó, illetve 6 nyomószilárdság átlagát) a *péptartalom,* a *péptelítettség* és a *cementmennyiség,* illetve *víz-cement tényező* függvényében dolgozta fel.

4. *A habarcs törési mechanizmusát* ún. *Béres-féle* módszerrel vizsgálta. A módszer lényege a felületi alakváltozás mérésen alapuló térfogatváltozás elemzése: $\Delta V = \Delta\varepsilon_x - 2 \cdot \Delta\varepsilon_y$. A kutatás során $6 \times 5 \times 3 = 90$ db $70{,}7 \times 70{,}7 \times 250$ mm méretű hasábot készített. A hasábok kezelése és tárolása azonos volt a szilárdsági vizsgálathoz készített próbatestekével. A 28 napos hasábokra a magasság felezőjében elhelyezte a HOTTINGER-D32 jelű 40 mm alaphosszú indukciós nyúlásmérőt az x hossz-, illetve az y keresztirányú alakváltozás mérésére. Két-két átellenes oldalon a σ_x–ε_x illetve σ_x–ε_y feszültség-alakváltozási függvényeket határozta meg. Ezeket HOTTINGER-típusú erősítővel és HONEYWELL X-Y-Y' rajzolóval fel is rajzoltatta.

A vizsgálatot az INSTRON 1197 típusú univerzális anyagvizsgáló géppel végezte. A vizsgálathoz – a központos erőátadás céljából – felhasználta az ún. *Zsigovics*-féle próbatesthez illesztett kettős gömbcsuklót.

5. *A ferrocement húzószilárdságának* (f_{ct}) meghatározására olyan próbatestet befogó szerkezetet tervezett és készített, amely biztosítja a központos húzást (*17.10. ábra*).

A húzóvizsgálatot – ellenőrző jellege révén – csak a D = 2 mm, folytonos (F2) és lépcsős (L2) sorozatokra végezte el. A ferrocement húzó próbatestek geometriai méreteit a *17.10. ábrán* tüntettük fel. Minden próbatest azonosan két – 8×8 mm négy-

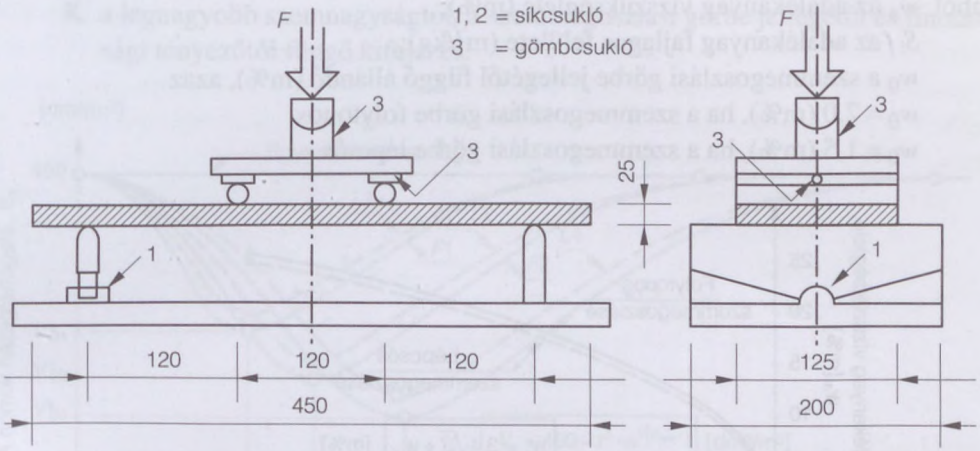


17.10. ábra. A húzó próbatest befogó szerkezete [*Thanh* (1986)]

zetlyukú, Ø = 1,0 mm galvanizált huzalból készült – fonott háló réteggel volt vasalva. A vasalást egyenletesen helyezte el. Egy sorozaton belül 5-féle péptelítettségű habarcskeveréket tervezett. Egy keverékből 3 db próbatestet készített, összesen $2 \times 5 \times 3 = 30$ db-ot.

A vizsgálat során HOTTINGER-D32 típusú indukciós nyúlásmérőt használt. Alap hossza hosszirányban (x) 80 mm, keresztirányban (y) 40 mm volt.

6. *A ferrocement hajlító-húzó szilárdságának* ($f_{ci,fl}$) vizsgálatára kifejlesztett egy olyan terhelőberendezést, amely kiküszöböli a próbatest esetleges gyártási hibájának (torzulásának) káros hatását az erőjátékban, azaz tiszta hajlítást tesz lehetővé (*17.11. ábra*).



17.11. ábra. A hajlító-húzó próbatest terhelő berendezése [*Thanh* (1987)]

A vizsgálathoz készített próbatestek mérete: $25 \times 125 \times 450$ mm. Vasalásuk azonos volt: 2 réteg fonott galvanizált háló (huzalátmérő Ø = 1,2 mm, lyukméret: 10×10 mm). Az összes próbatest száma $2 \times 5 \times 3 = 30$ db volt.

A vizsgálat folyamán a támaszköz felezőjében mérte:

– a alsó felületen a nyúlást (D32/40 mm),

– a felső felületen a rövidülést (D32/40 mm),

– a lehajlást (HOTTINGER W 20).

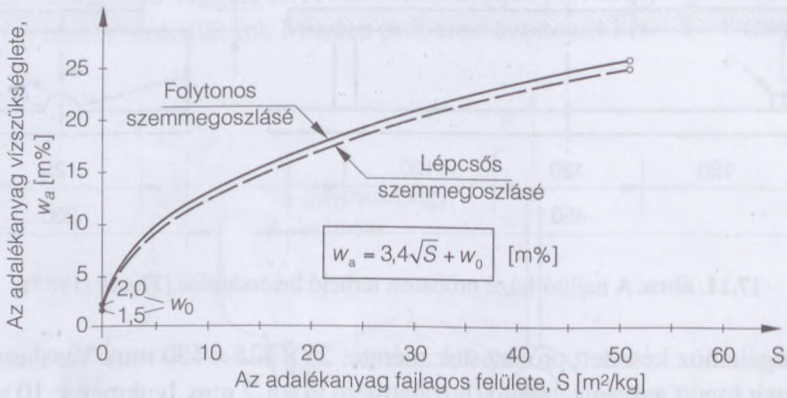
A ferrocement húzó-, illetve hajlító-húzó vizsgálatát szintén INSTRON 1197 típusú univerzális anyagvizsgáló géppel végezte el. Az alakváltozásokat és a lehajlást HOTTINGER típusú erősítő közbeiktatásával HONEXWELL X-Y-Y', illetve TESLA típusú X-Y rajzolóval rajzoltatta fel.

17.6.3. Az értekezés új tudományos eredményei

1. A homok adalékanyag fajlagos felületének függvényében felírt egy analitikai összefüggést, amelynek segítségével meghatározható egy olyan homok-víz keverék vízszükséglete, amelynek a terülése szabványos habarcsterülést vizsgáló készüléken mérve 13–16 cm, és *vízkiválás nincs*. Az ehhez szükséges és elégséges vízmennyiség, amely a homokszemeket vékony vízfilmmel vonja be, a következő képlettel fejezhető ki (*17.12. ábra*):

$$w_a = 3{,}4 \cdot \sqrt{S} + w_o$$

ahol w_a az adalékanyag vízszükséglete (m%);
S az adalékanyag fajlagos felülete (m^2/kg);
w_0 a szemmegoszlási görbe jellegétől függő állandó (m%), azaz
$w_0 = 2{,}0$ (m%), ha a szemmegoszlási görbe folytonos
$w_0 = 1{,}5$ (m%), ha a szemmegoszlási görbe lépcsős



17.12. ábra. Az adalékanyag vízszükséglete a fajlagos felület függvényében [*Thanh* (1987)]

2. Bevezetett egy $t = \dfrac{m}{\sqrt{S}}$ *finomsági tényezőt* (technikai mérőszámot), amelynek két fontos tulajdonsága van:

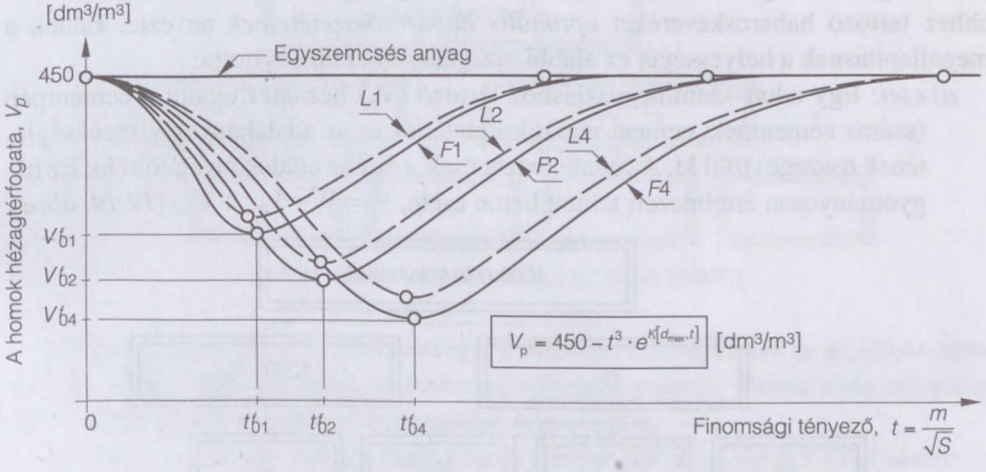
– A hézagtérfogatot kifejező $V_p = V_p(m, S)$ kétváltozós függvényt a $V_p = V_p(t)$ egyváltozós függvénye alakítja át, ezáltal megkönnyíti a függvény kezelhetőségét.
– Egyértelműbbé teszi a hézagtérfogatot kifejező függvényt a V_p–V_p(m), illetve $V_p = V_p(S)$ függvényekkel szemben

ahol m az Abrams-féle finomsági modulus,
S az adalékanyag fajlagos felülete (m^2/kg),
V_p az adalékanyag hézagtérfogata (dm^3/m^3)

3. A homok adalékanyag *Abrams–Popovics*-féle m finomsági modulusa és az *S fajlagos felülete* egyidejű figyelembevételével (*t*), a saját mérési eredményekre támaszkodva felírt egy olyan függvényt, amelynek segítségével közelítően kiszámítható az adott száraz homokkeverék V_p hézagtérfogata (*17.13. ábra*):

$$V_p = 450 - t^3 \cdot e^{K(D,t)} \text{ (dm}^3\text{/m}^3\text{)}$$

ahol V_p az adalékanyag hézagtérfogata (dm³/m³),
t az ún. finomsági tényező,
D a legnagyobb szemnagyság, (1 mm ≤ D ≤ 4 mm,
K a legnagyobb szemnagyságtól, a szemmegoszlási görbe jellegétől és finomsági tényezőtől függő kifejezés.



17.13. ábra. A homok hézagtérfogata a finomsági tényező függvényében [*Thanh* (1987)]

– ha *folytonos* a szemmegoszlási görbe jellege, akkor

$$K_f = \frac{156t(D + 5{,}80) + 4D^3 - 21D^2 - 1021D - 1886}{D^3 - 12D^2 - 140D - 221}$$

– ha *lépcsős* a szemmegoszlási görbe jellege, akkor

$$K_f = \frac{12t(D + 2{,}15) + 5{,}3D^3 - 40D^2 - 300D - 290}{D^3 - 9D^2 - 39D - 31{,}4}$$

4. Egy adott D szemnagyság esetén azonos jellegű szemmegoszlások között létezik egy és csak egy t_0 *finomsági tényezőjű,* ún. *optimális szemmegoszlás,* amelynek legkisebb a hézagtérfogata (V_{p0}). A legnagyobb szemcseméret növelésével az optimális finomsági tényező nő (*17.13. ábra*).

Az optimális hézagtérfogat a következő képlettel számítható:

$$V_{po}^{f} = 450 - t_{fo}^{3} \cdot e^{K_f}$$

$$V_{po}^{\ell} = 450 - t_{\ell o}^{3} \cdot e^{K_\ell}$$

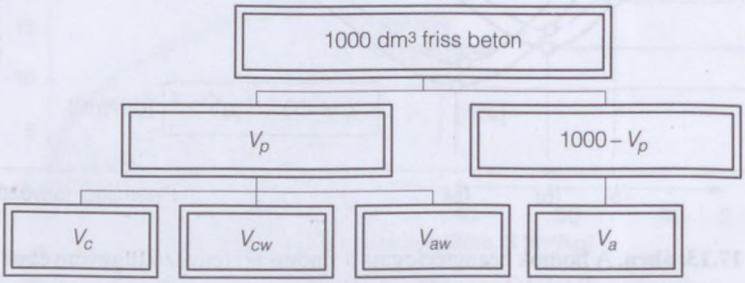
ahol

$$t_{fo} = -0{,}0192D^2 + 0{,}3375D + 0{,}7317$$

$$t_{\ell o} = -0{,}00417D^2 + 0{,}4750D + 0{,}6170$$

5. Megállapította, hogy a ferrocement telítetlen, sőt telített betonjának olyan kicsi a szilárdsága, hogy azt el kell ejteni. Míg a szokványos betonok tulajdonságai péptelített betonok esetén a legkedvezőbbek, addig a ferrocement tartományában van olyan *túltelítettség,* amellyel mind a bedolgozhatóság, mind a szilárdság és a cementadagolás a legkedvezőbb. Ezt a túltelítettséget *gyakorlati telítettségnek* és az ehhez tartozó habarcskeveréket *optimális habarcsösszetételnek* nevezte. Ennek a megállapításnak a helyességét az alábbi vizsgálatokkal bizonyította:

a) eset: Egy adott szemmegoszláshoz tartozó (V_p) hézagtérfogatot a cementpép (száraz cementnek, cement vízszükségletének és az adalékanyag vízszükségletének összege) tölti ki. Az adalékvázat csak a száraz adalékanyag tölti ki. Ez hagyományosan értelmezett telített beton esete, $V_p = V_c + V_{cw} + V_{aw}$ (*17.14. ábra*).



17.14. ábra. Az elméleti péptelítettség [*Thanh* (1987)]

b) eset: Egy adott szemmegoszláshoz tartozó (V_p) hézagtérfogatot csak a száraz cement és cement vízszükséglete tölti ki. Az adalékvázat pedig a száraz adalékanyag és adalékanyag vízszükséglete tölti ki, $V_p = V_c + V_{cw}$ (*17.15. ábra*).

c) eset: Egy adott szemmegoszláshoz tartozó (V_p) hézagtérfogatot csak a száraz cement tölti ki. Az adalékvázat pedig a cement vízszükséglete és száraz adalékanyag, valamint az adalékanyag vízszükséglete tölti ki, $V_p = V_c$ (*17.16. ábra*).

Jelmagyarázat

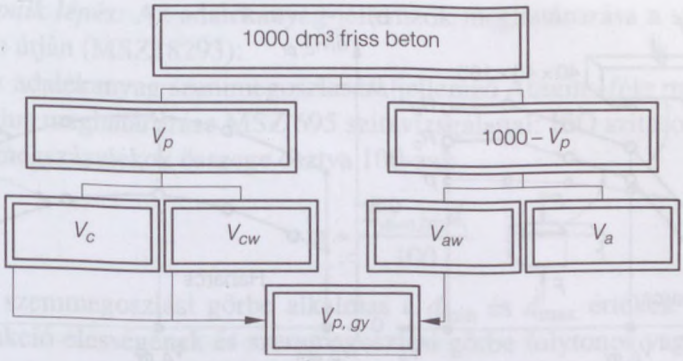
V_p az adalékanyag hézagtérfogata (dm³/m³)

V_{cw} a cement szabványos vizsgálatához szükséges vízmennyiség (dm³/m³)

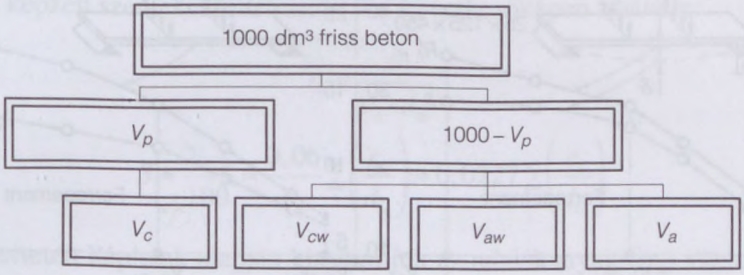
V_{aw} az adalékanyag vízszükséglete (dm³/m³)

V_c, illetve V_a a cement, illetve adalékanyag térfogata (dm³/m³),

$V_{p,gy}$ a gyakorlati péptelítettség (dm³/m³).



17.15. ábra. A gyakorlati péptelítettség [*Thanh* (1987)]



17.16. ábra. A péptúltelítettség [*Thanh* (1987)]

A *b) esetnek* megfelelő túltelítettséget *gyakorlati telítettségnek* és az ehhez tartozó habarcskeveréket *optimális habarcsösszetételnek* nevezte. Ennek a megállapításnak a helyességet az alábbi vizsgálatokkal bizonyította:

– A habarcs nyomó-, illetve hajlító-húzó szilárdsága (f_c; $f_{ci,\,fl}$) (*17.17a) ábra*).

– A habarcs törési mechanizmusa ($f_{c.pr}$, E, ΔV függvény) (*17.17b) ábra*).

– A ferrocement húzó-, illetve hajlító-húzó vizsgálat (f_{ct},$f_{ci,\,ft}$, ε_x, σ) (*17.17c) ábra*).

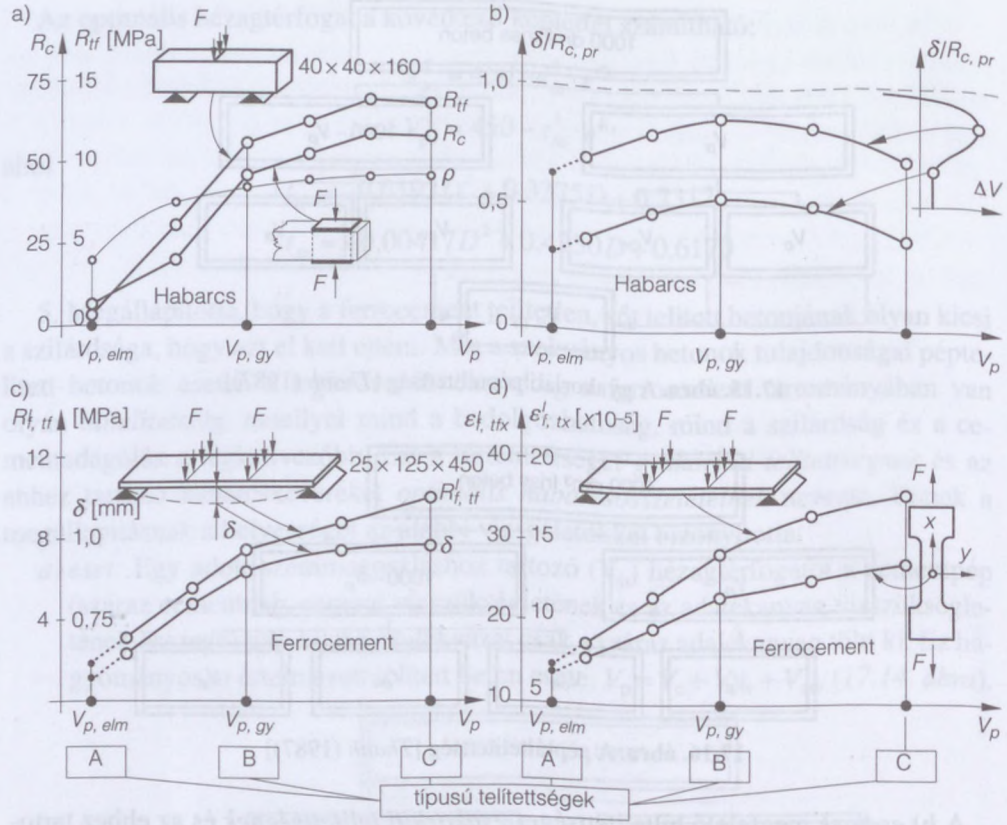
6. A kísérleti eredmények alapján megállapította, hogy a feltételezett három alaptípusú telítettségre való tervezési mód közül a B típusú telítettség adja meg a gyakorlati telítettséget. A gyakorlati telítettség az elméleti telítettségtől (telített betonétól való eltolódásának mértéke a D maximális szemcseméret növelésével csökken (*17. 18. ábra*).

7. A gyakorlati telítettség elméleti telítettségtől való eltolódásának hatása a hálóval vasalt habarcsra (ferrocementre) is érvényes (*17.17c)–d) ábra*).

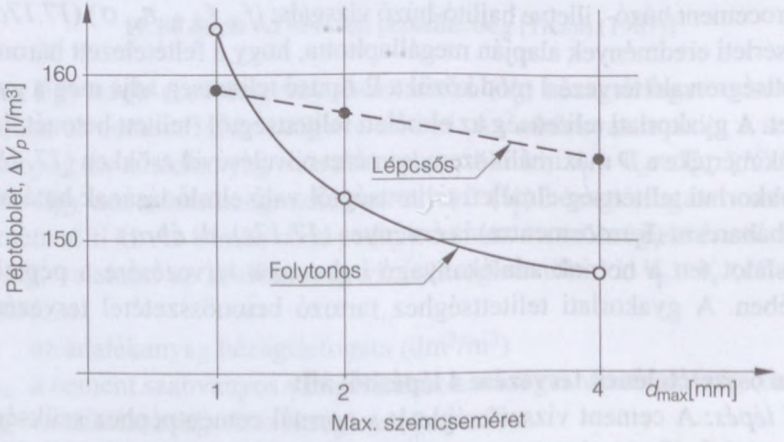
8. Javaslatot tett a homok adalékanyagú habarcsok tervezésére a péptelítettség függvényében. A gyakorlati telítettséghez tartozó betonösszetétel tervezésének a menete:

A beton összetételének tervezése 4 lépésből áll:

a) Első lépés: A cement vízszükségletét a normál cementpéphez szükséges vízmennyiség adja, amely a magyar cementek esetében rendszerint 27–30 tömegszázalékra vehető.



17.17. ábra. A habarcs, illetve a ferrocement tulajdonságainak változása a péptelítettség függvényében [*Thanh* (1987)] a) habarcs hajlító-húzó és nyomószilárdsága, b) habarcs hasábszilárdsága és törésmechanizmusa, c) a ferrocement hajlító-húzó szilárdsága, d) a ferrocement húzószilárdsága.



17.18. ábra. A péptöbblet mértékének változása a legnagyobb szemcseméret függvényében [*Thanh* (1987)]

b) Második lépés: Az adalékanyag-jellemzők meghatározása a vizsgálat és számítás útján (MSZ18293):

– Az adalékanyag szemmegoszlására jellemző Abrams-féle m finomsági modulus meghatározása MSZ 695 szitavizsgálattal: ISO szitasoron fennmaradt tömegszázalékok összege osztva 100-zal:

$$m = \frac{\Sigma^{D}_{di=0,063} d_i}{100}$$

– A szemmegoszlási görbe alkalmas a d_{min} és d_{max} értékek jellemzésére, a frakció élességének és szemmegoszlási görbe folytonos vagy lépcsős jellegének meghatározására.

– Fajlagos felület számításához Palotás-féle képlet (1952), amely – gömb alakú képzelt szemeket feltételezve – a következőképen írható le:

$$s_i = \frac{6}{\rho_a \cdot d_{ai}}$$

$$S = \frac{\Sigma_{si \cdot ai}}{100} = \frac{0,06}{\rho_a} \Sigma \left(\frac{c_i}{d_{ai}} \right) = 0,0227 \Sigma \left(\frac{c_i}{d_{ai}} \right)$$

Az ismertetett képletek alapján kiszámítjuk az adalékanyag (w_a) vízszükségletét és finomsági tényezőjét (t).

Meghatározzuk az adalékanyag (V_p) hézagtérfogatát.

Példa az s_i értékek számítására: $d_{ai} = \sqrt{d_i \cdot d_{i+1}}$, és $\rho_a = 2,64$ kg/dm^3 (dunai kavicsos homok) (*17.2. táblázat*).

c) Harmadik lépés: A gyakorlati péptelítettséghez tartozó, kissé képlékeny (KK), illetve képlékeny (K) konzisztenciájú frissbeton az elméleti telítettséghez viszonyított viszonyszámait a *17.3. táblázat*ban adta meg.

d) Negyedik lépés: Próbakeveréssel ellenőrizni kell a keverék tulajdonságait. A betonösszetétel meghatározásának két számítási módja lehetséges:

– vagy a cementtartalmat szabjuk meg (például elő van írva a megengedett legkisebb, illetve legnagyobb cementtartalom), és számítjuk a szükséges vízadagolást, valamint az adalékanyag-tartalmat,

17.2. táblázat. Adalékanyag frakciók átlagos szemcseátmérője és fajlagos felülete

Szemnagyság, mm	Átlagos átmérő, mm	Fajlagos felület, m²/kg	Szemnagyság, mm	Átlagos átmérő, mm	Fajlagos felület, m²/kg
0,0313–0,063	0,0442	51,4259	0,5–1,0	0,7071	3,214
0,063–0,125	0,0884	25,713	1,0–2,0	1,4142	1,607
0,125–0,25	0,1768	12,8565	2,0–4,0	2,8284	0,803
0,25–0,50	0,3536	6,4282	4,0–8,0	5,6569	0,401

17.3. táblázat. Gyakorlati péptelítettséghez tartozó betonösszetételek

Sorozat jele	F1	F2	F4	L1	L2	L4
Szemmegoszlás jellege	Folytonos			Lépcsős		
Max. szemcseméret, mm	1	2	4	1	2	4
Túltelítettség, r	1,542	1,576	1,644	1,568	1,645	1,738
Péptöbblet, liter/m³	162,5	152,5	148,0	159,0	158,0	155,0
Víz-cement tényező x = v/c	0,583	0,612	0,642	0,603	0,655	0,702

– vagy a víz-cement tényezőt szabjuk meg (például az igen kopásálló betonra) és számítjuk a szükséges cement- és víztartalmat, valamint az adalékanyagtartalmat.

9. Húzóvizsgálathoz olyan próbatestbefogó szerkezetet fejlesztett ki (*17.10. ábra*), amely tökéletesítve csavarásmentes központos húzást tesz lehetővé és kimutatja a próbatest esetleges készítési hibáját (például a vasalás elhelyezése nem központos, a bedolgozás nem egyenletes).

17.6.4. A kutatási eredmények hasznosítása

Az értekezés eredményei a ferrocement betonjának gazdaságos és biztonságos tervezéséhez közvetlenül felhasználhatók. Alkalmazásuk egyszerű és kellő pontosságú. Az adalékanyag szemmegoszlásával kapcsolatos problémák tárgyalásának szemléletessége és egyszerűsége miatt az oktatásban is felhasználhatók. Lehetőségeket nyújt az e témakörrel foglalkozó mérnökök, kutatók számára újabb jellemzési módokra vonatkozóan. Húzóvizsgálatnál bemutatott próbatestet befogó szerkezet tökéletesítésével teljesen megoldotta a központos erőátadási problémát. Ez méréstechnikai szempontból nagyon fontos és lényeges előrelépést jelentett.

18. Szövetszerkezetes építési mód (dermesztett beton)

18.1. Fogalma

A dermesztett beton olyan nedvszívó (rendszerint gipsz-) zsaluzatban készített beton, amelyet folyós betonként öntünk a zsaluzatba, a zsaluzat a vizet a betonból elszívja, így a beton földnedvesként szilárdul meg. Az így létrejövő szerkezet könnyűszerkezetes, szilikát bázisú, merev, monolitikus vasbeton szerkezet. A dermesztett betonszerkezet az anyag, a szerkezet és a technológia szétválaszthatatlan egységét jelenti.

18.2. Történeti áttekintés

18.2.1. Szerkezet

Sámsondi Kiss Béla 1941–44-ben dermesztett betonból építette Budapest, II. kerület Dayka Gábor u. 83. alatti házát. Az építés tapasztalatait *Szövetszerkezetes épületek* című könyvében ismertette [*Sámsondi* (1965)].

A második világháború után munkássága több irányban folytatódott. Az ÉTI-ben az 1960-as években eljárást dolgoztak ki a gipszzsaluzatban dermesztett beton készítésére. Kísérleti épületeken (Diogenes szállítható hétvégi ház, budafoki Maisonette-ház) vizsgálták a szerkezet és az anyag viselkedését.

18.2.2. A dermesztett betonanyagok és a velük készített szerkezetek

A dermesztett betonanyagokat, illetve gipszbeton szerkezetet szaklaboratóriumok évek óta vizsgálják [ÉTI, ÉMI, BME Vasbeton szerkezetek Tanszék, Építőanyagok Tanszék (1976–1987), PMMF, VGI Építő Laboratórium, Baja (1988–1991), Ybl Miklós Főiskola Akkreditált Építőanyag Laboratórium Budapest (1992–2007), SZIE-YMÉK Építőanyag Laboratórium].

A laboratóriumi és a helyszíni vizsgálatokkal párhuzamosan *Párkányi* (1969) foglalkozott a *nem tektonikus szerkezetek* elméletével, beleértve a dermesztett betont.

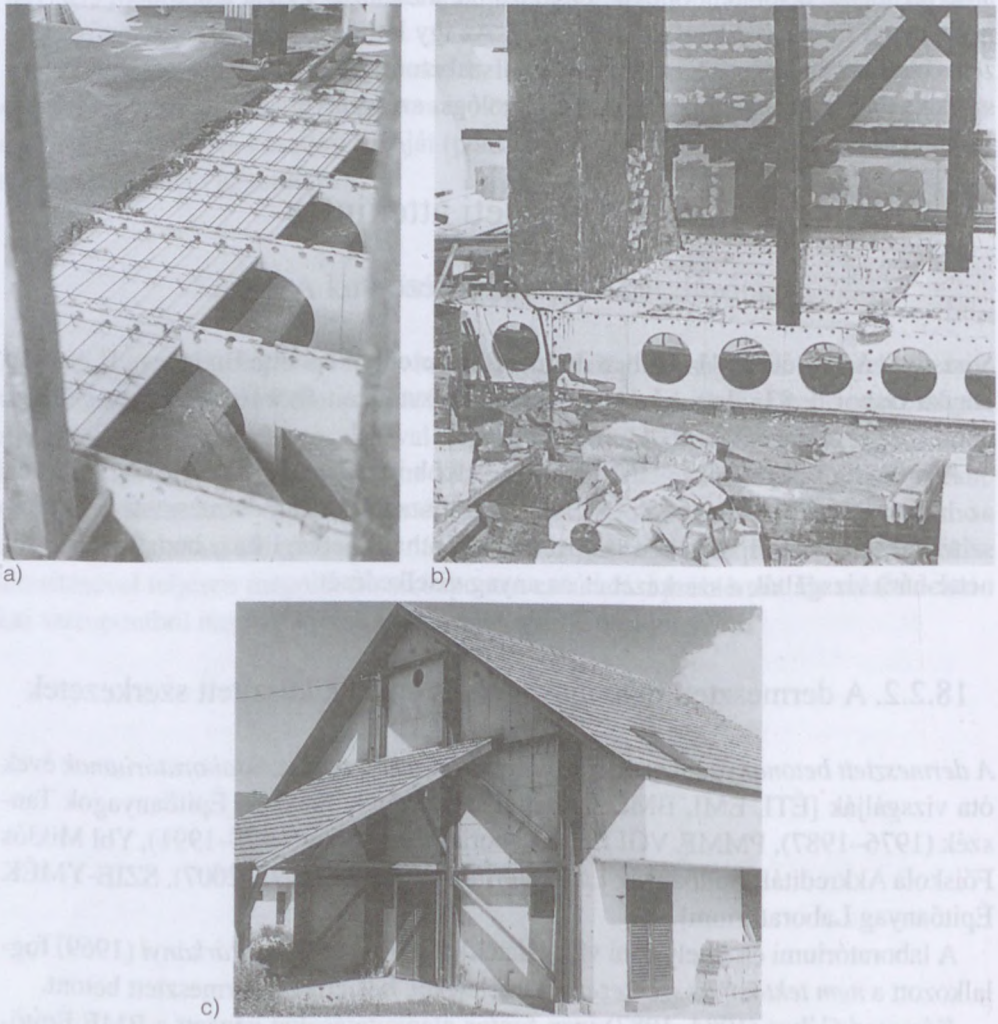
Kászonyi Gábor (1984, 1987) igen fontos alapkutatásokat végzett a BME Építőanyagok Tanszékén a dermesztett beton anyagjellemzőinek a meghatározására. E témakörből írta kandidátusi értekezését [*Kászonyi* (1994–1995)].

Az 1970-es évek elejétől együttműködve építészekkel, fokozatosan kidolgozta a dermesztett beton vizsgálati és méretezési elveit. [*Kászonyi* (1984–1987, 1993, 1994–1995, 1991, 1998, 1999, 2001, 2004)].

Több mint száz épületet tervezett *Szövényi* István, *Czoch* Andrea, *Albert* Tamás, *Ónodi* Sz. Lajos és dr. *Kászonyi* Gábor, akik a szövetszerkezetes építésre szabadalmat kaptak.

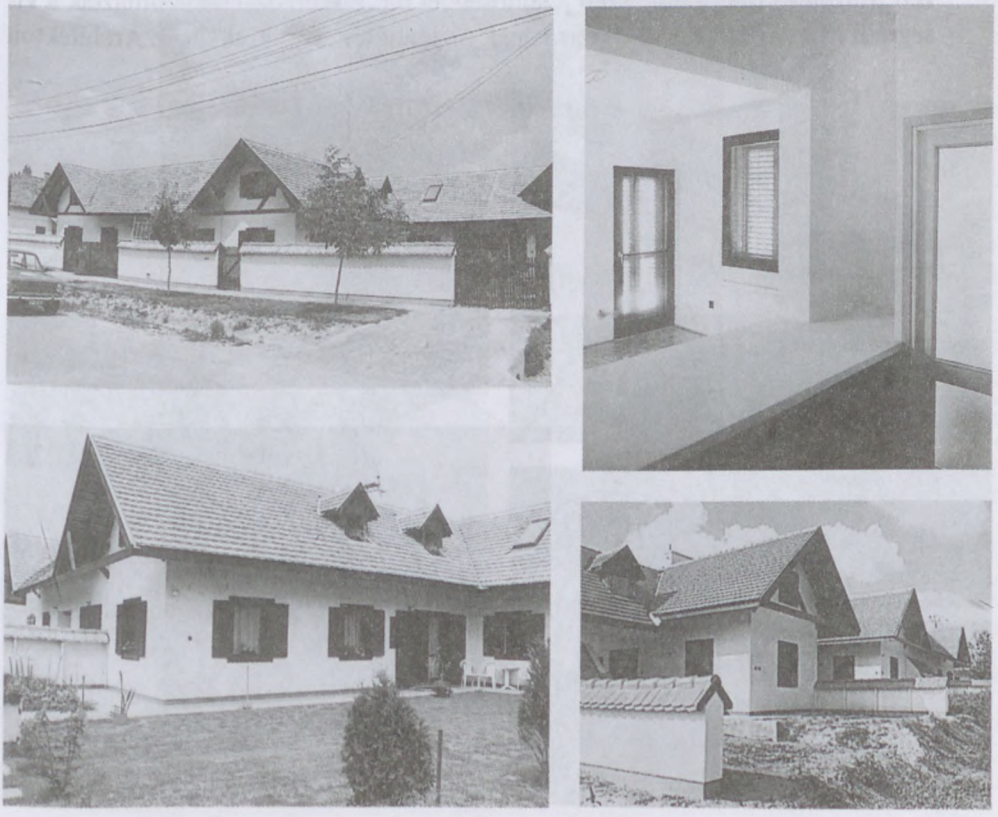
Példák a tervezett és megvalósult épületekről [*Kászonyi* (2001)].

– Az Ybl Miklós Műszaki Főiskola nagy támaszközű, takarékütőreges födémszerkezete a tetőtérben (1983–84), melynek vizsgálatát a BME korábban elvégezte (*18.1. fénykép*).



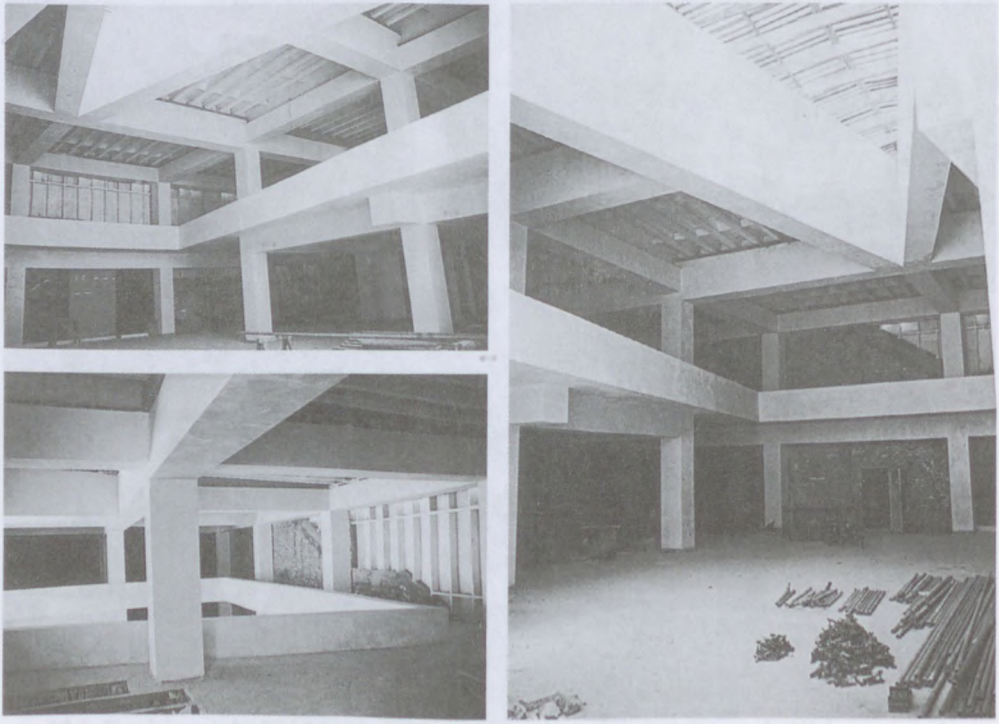
18.1. fénykép. a)–b): Ybl Miklós Műszaki Főiskola tetőtér-beépítése takarékütőreges vasalt, dermesztett homokbeton födémszerkezettel (1983–1984);
c): Kétszintes nyaralóépület gipszbetonból, Sukoró, Iharos-dűlő (1984–1985)

– 1984-ben a BNV-n mutatták be a kis térelemes pavilont. Galériás iroda és számítógépes központ épült a Földhivatal Benczúr utcai épületének tetőterében 1985–86-ban, meghagyva és felújítva a régi faszerkezetet.
– Eddig egyetlen íves térlefedő szerkezet készült a 31-es ÁÉV „Y"-tartóihoz, melyet az 1987-es BNV-n mutattak be és a bólyi, illetve a mágocsi hűtőtárolók lefedésénél nagy mennyiségben alkalmaztak.
– A négylakásos *udvarház* Dunaújvárosban 1989-ben épült, az építésről az építésmódot bemutató filmet készítettek. Az épületeknél térszíni lemezalapozást és favázon *előszerelt* tetőszerkezetet alkalmaztak. Ennek védelme alatt építették meg a gipszbeton lakóépületeket, melyeknek csapóeső elleni felületi védelmét épületszerkezeti megoldások biztosították (*18.2. fénykép*).
– 1990-ben épültek a Skála-Coop kétszintes tetőtéri irodái (Budapesten), térelemes nyaraló Szentendrén, valamint a Magyar Nemzeti Múzeum tetőterében létesített, 10,5 m fesztávolságú, 10 kN/m^2 hasznos terhelésű, dinamikus igénybevételnek is kitett raktárfödém és tetőtéri keretszerkezet.



18.2. fénykép. Négylakásos udvarház (Átrium-ház) gipszbeton méretezett teherhordó szerkezettel. Dunaújváros, Móricz Zsigmond utca (1986–1989)

– 1992-ben kezdődött a pécsi Székesegyház melletti Keresztény Múzeum (Dómkőtár) építése. A többszintes, gipszbeton vázszerkezetes, többfunkciós (kőtár, keresztény múzeum, hangverseny- és kiállítóterem, tetőterasz stb.) építész tervezője, *Bachman* Zoltán (1991) az épületről az alábbiakat írta:
A Dóm-múzeum belső kialakítása rendkívül visszafogottra tervezett, a hófehér gipszfelületre helyezzük el a kőtári anyagot, mintegy szerény foglalatot képezve a ragyogó mívességű középkori köveknek. Ez az ún. szövetszerkezet véleményünk szerint kiválóan szolgálja a töredékes kőanyag elegáns elhelyezését, e szerény gipszfelületen szépen érvényesül a középkori kőanyag, mely némelyike festett.
Az épület alaprajzilag és homlokzatilag jól összehangolt a környezetével, a városképi jelentőségű, történetileg fontos és értékes pécsi Dómmal. Az épület felülvilágító üvegszerkezetének térdfala jelenleg a legnagyobb támaszközű ($\ell = 12$ m) gipszbeton szerkezet Magyarországon (*18.3. fénykép*).
– A gipszbeton szerkezeteket szívesen alkalmazzák – kis testsűrűségük miatt – emeletráépítéseknél, tetőbeépítéseknél. A technológia jelentős előnye, hogy könnyen kapcsolható más meglévő szerkezetekhez, ami műemlékek esetén (Magyar Nemzeti Múzeum) fontos építészeti jelentőséggel bír. E szerkezetet alkalmazták a visegrádi Mátyás király-palota termeinek újjáépítésénél is (kivitelező: Architekton

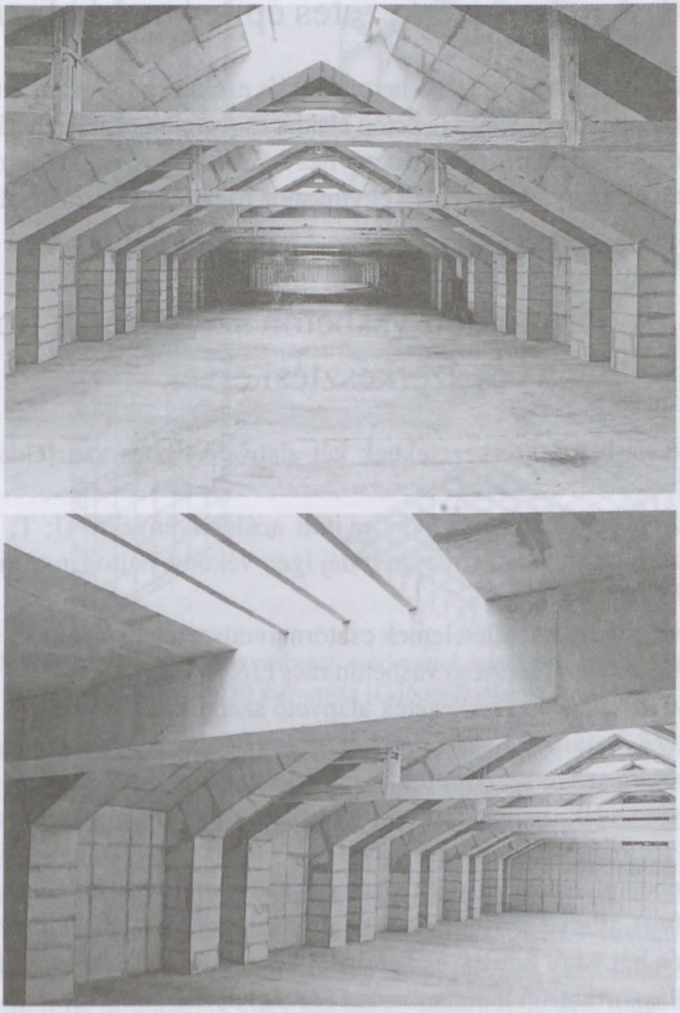


18.3. fénykép. Dóm-múzeum (Dómkőtár) kétszintes vasalt, dermesztett gipszbeton szerkezet, Pécs (1988–1992) a) földszint, belső tér a galériával; b) galériaszint

Rt., 1999–2000), ahol a meglévő egy szint magasságú falak a hagyományos kő-, vagy téglaboltozat nyomását nem bírták volna el (*18. 4. fénykép*).

– Gipszbeton szerkezet felhasználásával készült az ELTE-BME egyetemi épületek összekötő tömbjének kétkérgű, 143 fm hosszú, íves, 4,60 m magas térelhatároló falainak tervezése is (Gerő–Szabó Építész Iroda Kft., statikus: dr. *Kászonyi* Gábor).

– A szerkezet minden évben több egyetemi és főiskolai hallgató érdeklődését is felkelti: egyes anyagtani és statikai feladatok megoldása eddig mintegy 15 tudományos diákköri, illetve díjazott diplomatervezési munkát eredményezett. A tárgyi szerkezetet kiállításokon, konferenciákon és termékbemutatókon



18.4. fénykép. Magyar Nemzeti Múzeum tetőtér-beépítés raktárfödém, Budapest V., Múzeum krt. (1991–1992)

ismertették, hazai folyóiratok (Építési Piac, Kő és Gipsz. Új Magyar Építőművészet, Építőmester stb.) állandóan tájékoztatnak a dermesztett betonszerkezetek építéséről.

– Ma már rendelkezésre állnak a dermesztett betonok helyszíni roncsolásmentes szilárdságbecslő vizsgálatainak kiértékelő módszerei és táblázatai is.

– Az ÉMI a dunaújvárosi udvarházak tapasztalatait is figyelembe véve 1990-ben Építőipari Alkalmassági Bizonyítványt (EAB) adott ki dermesztett betonszerkezetekre, majd Alkalmazástechnikai Kézikönyv jelent meg 1991-ben a kutatások és tervezési eredmények összefoglalásaként.

18.3. A szövetszerkezetes építés munkafázisai

a) Gipszidomok előregyártása (a beton alakját ezekkel határozzuk meg).
b) Gipszidomok előregyártása (a beton alakját és méreteit ezekkel határozzuk meg).
c) A kis merevségű betonszövet (merevítés I. fázisa) gipszzsalu idomokba öntése.
d) Üzemben előre gyártott elemek egymáshoz rögzítése (merevítés II. fázisa).

18.4. A dermesztett vasbeton szerkezetek típusai és szerkesztési elvei

A dermesztett vasbeton szerkezeteknek két alapvető típusa van [*Gábor–Párkányi* (1985)].

a) Hajtogatott héj alakja zárt vagy nyitott acélszelvényekre (I; T; V idomokra) emlékeztet. Ugyanis a dermesztett héj igen vékony, hajtogatott membrán szerkezet (*18.1a) ábra*).

b) Szövetváz, amely a felületelemek csatornarendszerében alakul ki. Alakja fonott szövet szálaira emlékeztető vasbeton rács (*18.1b) ábra*).

A dermesztett vasbeton szerkezetek alapvető szerkesztési elvei:

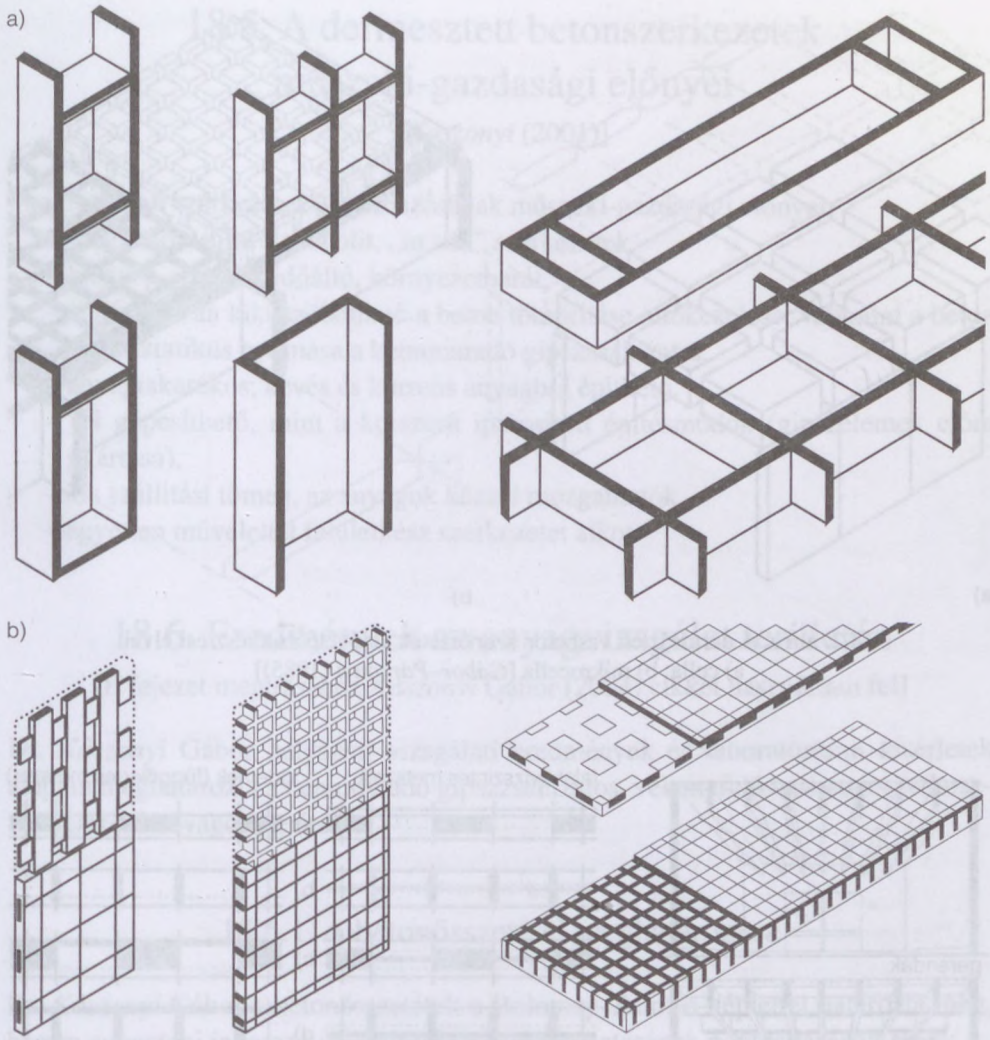
a) A cella (*18.2. ábra*) a hajtogatott héj formáinak használatát jelenti.

b) A mikrocella szövetszerkezetek számos formájának a használatát jelenti.

Lehetnek gerendák, gerendarácsok, vagy lemezek. Ezek jelentik a dermesztett beton látható formáit.

Falak esetében pl. használhatunk kizárólag szövetet. E szövet lehet sűrű vagy laza (*18.3a)–b) ábra*), illetve szövet és héj kombinációja (*18.3. c)–d) ábra*) bordák, gerendarácsok és héj vagy bordák és kettőshéj kombinációit (*18.3e)–f) ábra*), s végül zárt, belsőcellás, orthotrop lemezműveket (*18.3g) ábra*).

Födémek esetében, ha a cellás rendszer gerendarácsokkal dolgozik, ismét használhatunk vasbeton szövetet (*18.3a)–b) ábra*), szövet és héj kombinációját (*18.3c)–d)*



18.1. ábra. A dermesztett vasbeton szerkezetek hazai alapvető típusai
a) hajtogatott héj; b) szövetváz [*Gábor–Párkányi* (1985)]

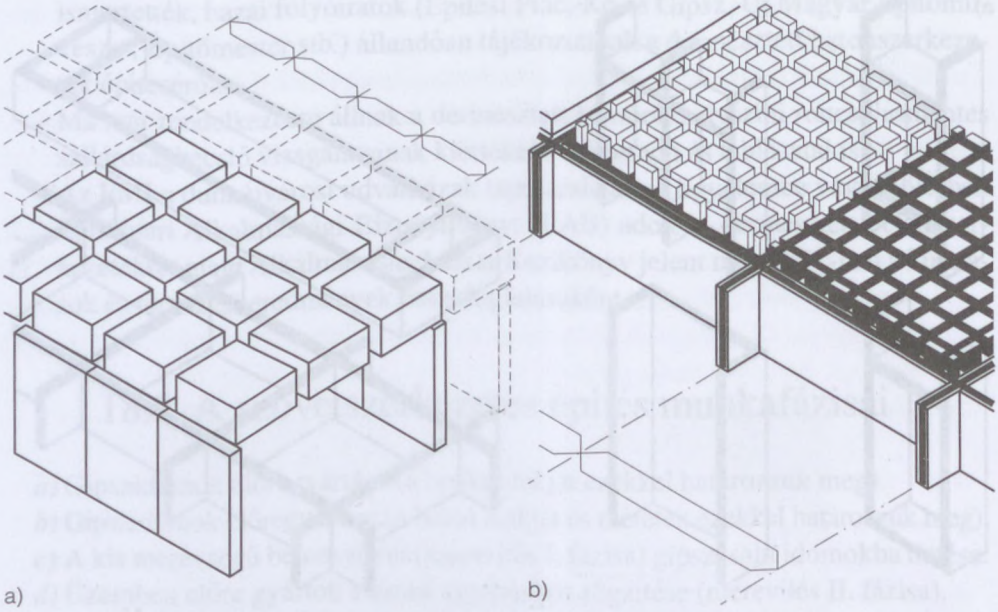
ábra), szobaméretű cellák esetében használhatjuk a borda, a szövet és a héj kombinációit (*18.3e)–f) ábra*), hőstabilizáló berendezések ebben az esetben rejtve maradhatnak a felület mögött (*18.3f) ábra*), végül alkalmazhatunk zárt, belsőcellás orthotrop lemezműveket is (*18.3g) ábra*).

Összetételük szerint a gyártott elemek lehetnek egyanyagúak (polisztirol vagy gipsz) vagy két anyag kombinációja (polisztirol + gipsz, gipsz + vasbeton).

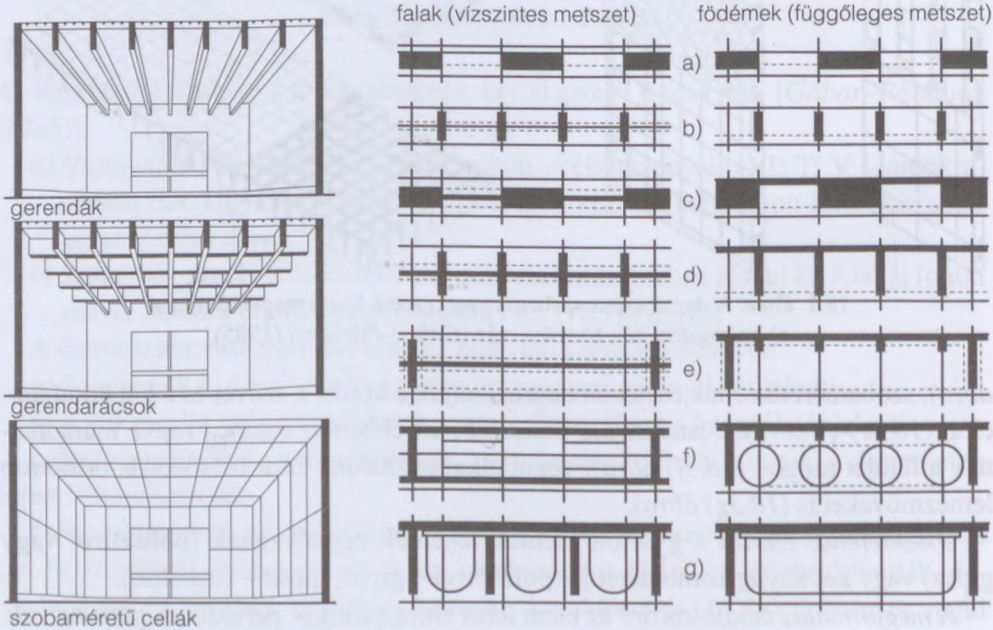
A *megformálás módja szerint* az elem lehet sima, profilos, periodikus, perforált stb.

A *geometriai alak alapján* sík vagy térelemet különböztetünk meg.

A *funkcionális rendeltetés* alapján az elem lehet fal-, pillér-, gerenda-, födém-, cella- stb.



18.2. ábra. A dermesztett vasbeton szerkezetek alapvető szerkesztési elvei
a) cella; b) mikrocella [*Gábor–Párkányi* (1985)]



18.3. ábra. A dermesztett vasbeton szerkezetek alapvető formái.
a) cellás szerkezetek; b) mikrocellás szerkezetek [*Gábor–Párkányi* (1985)]

18.5. A dermesztett betonszerkezetek műszaki-gazdasági előnyei

[*Kászonyi* (2001)]

A gipszbeton szerkezetek alkalmazásának műszaki-gazdasági előnyei:

- változatos, mint a monolit, „in situ" szerkezetek,
- könnyű, stabil és időálló, környezetbarát,
- építése során kiküszöbölhető a beton tömörítése, utókezelése, valamint a beton hidrosztatikus nyomása a bennmaradó gipszzsaluzatra,
- anyagtakarékos, kevés és kurrens anyagból építhető,
- jól gépesíthető, mint a korszerű iparosított építésmódok (gipszelemek előre gyártása),
- kis szállítási tömeg, az anyagok kézzel mozgathatók,
- egyetlen művelettel felületkész szerkezetet alkot.

18.6. Eredmények az anyagvizsgálat területén

[E fejezet megírásához *Kászonyi* Gábor (2004) cikkét használtam fel]

Dr. *Kászonyi* Gábor helyszíni vizsgálati eredmények és laboratóriumi kísérletek alapján meghatározta a bennmaradó gipszzsaluzatos, vékonyfalú vasbeton szerkezetek célszerű anyagösszetételét.

18.6.1. A betonösszetétel meghatározása

Dr. *Kászonyi* Gábor a betonösszetételt a Bolomey–Palotás-képlettel határozta meg, három anyagtani jellemző szilárdságra gyakorolt hatásának pontosításával. Ezek:

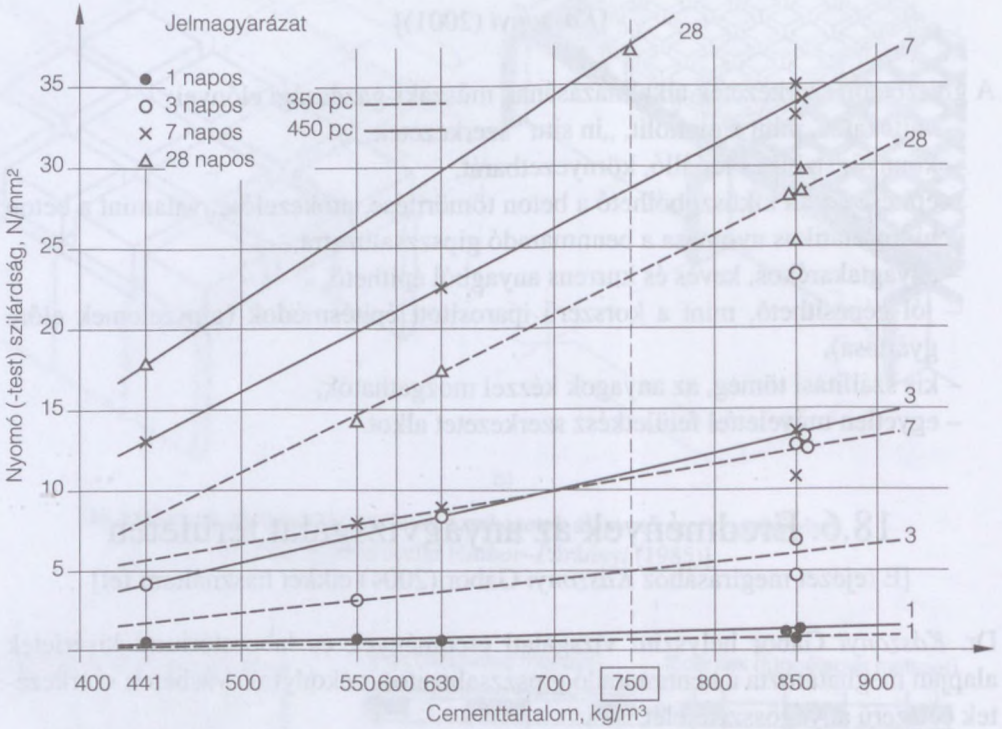
- A cement mennyiségének és minőségének hatása a dermesztett homokbeton szilárdságára, illetve szilárdulási ütemére
- A cementtartalom és adalékanyag tömegének optimális aránya dermesztett betonok összetételében
- A gipsz zsaluzóelem nedvességelszívó („dermesztő") hatása a dermesztett homokbeton önthetőségére, illetve szilárdságára.

A cement hatása a beton tulajdonságaira:

Anyagvizsgálati kísérleteik során a dermesztett betonok készítéséhez alkalmazott cementekre vonatkozóan az alábbi összefüggések állnak fenn:

- *A szilárdságilag szükséges cementmennyiség a normál betonok esetében alkalmazott számítási képletekkel meghatározható.*

– A *dermesztett betonok szilárdsága nő,* ugyanakkor a nagyobb cementadagolású dermesztett betonok *szilárdsági szórása nagyobb* (*18.4. ábra*).



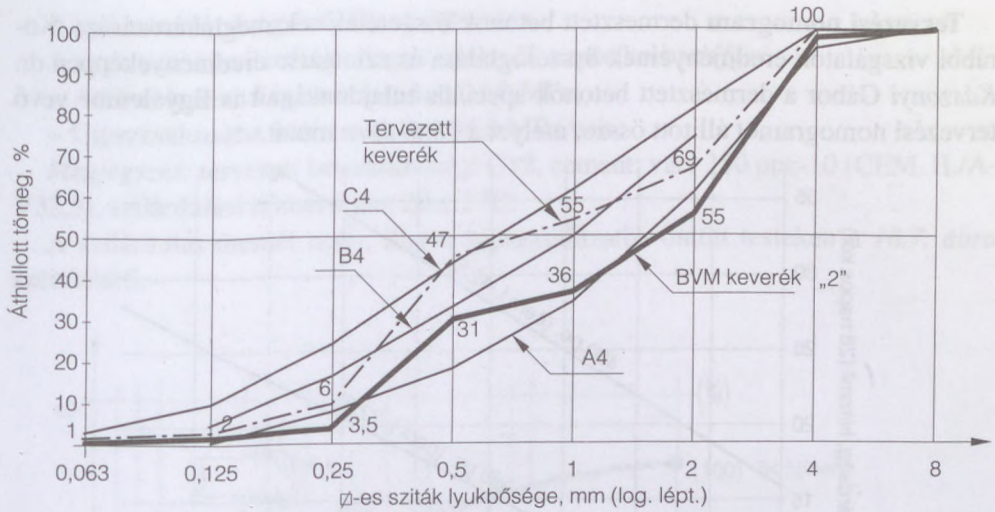
18.4. ábra. A nyomószilárdság változása a cementtartalom függvényében [*Kászonyi* (2001)]

Megjegyzés: A cementtartalom növelésével valószínűleg elérhető lenne egy optimális (maximális) szilárdsági érték, mely felett – túltelített betonoknál – a szilárdság csökkenő tendenciát mutatna. A vizsgált gyakorlati tartományban az összefüggés lineárisnak tekinthető).

– A *mechanikai tulajdonságok* – bár a cementadagolás hatása egyértelműen bizonyítható – *döntő mértékben függenek a dermesztett beton testsűrűségétől* ($\rho_t \cong 1950 - 2250$ kg/m^3).
– A dermesztett betonok *maradó víz-cement tényezője* laboratóriumi vizsgálatok szerint: $x_m = 0{,}24 - 0{,}25$, mely a legnagyobb szilárdságot biztosítja.
– A nagy portlandcement-adagolás révén *a betonacél-korrózió a minimumra csökken,* így az (előírt) *betonfedés vastagsága mintegy 1/3 mértékűre redukálható.*

Adalékanyag szempontjából a gipszzsaluzatban a dermesztett homokbeton (gipszbeton) általában megfelelő, ha (*18.5. ábra*) alábbiak teljesülnek:

– Adalékanyaga inert (a cement kötését nem befolyásolja).



18.5. ábra. A dunaújvárosi kísérleti elemek adalékanyagának tervezett és tényleges szemmegoszlási görbéje [*Kászonyi* (2001)]

– Az adalékanyagban a finom (0,063/0,025 mm) frakció (m_{h1}) és cement (m_c) együttes tömegének és a durva (0,25/4 mm) homokfrakciónak (m_{h2}) aránya:

$$\frac{m_{h1} + m_c}{m_{h2}} \cong 1,0$$

– Kívánatos az öntési tapasztalatok alapján, hogy a *cement-homok tömegarány 0,8–1,0 közötti legyen.*

– A 0,25/1 mm folyami homok *rosszul keverhető habarcsot* eredményez, csomóssá teszi a pépet, és folyamatos szemmegoszlású adalékanyag keverékben a tömegaránya 35% alatt megfelelő.

– Önálló adalékanyagként a 0,25/1 mm-es szemnagyság *nem használható.*

A vízmennyiség meghatározásánál a normál kavicsbetonoknál szokásos

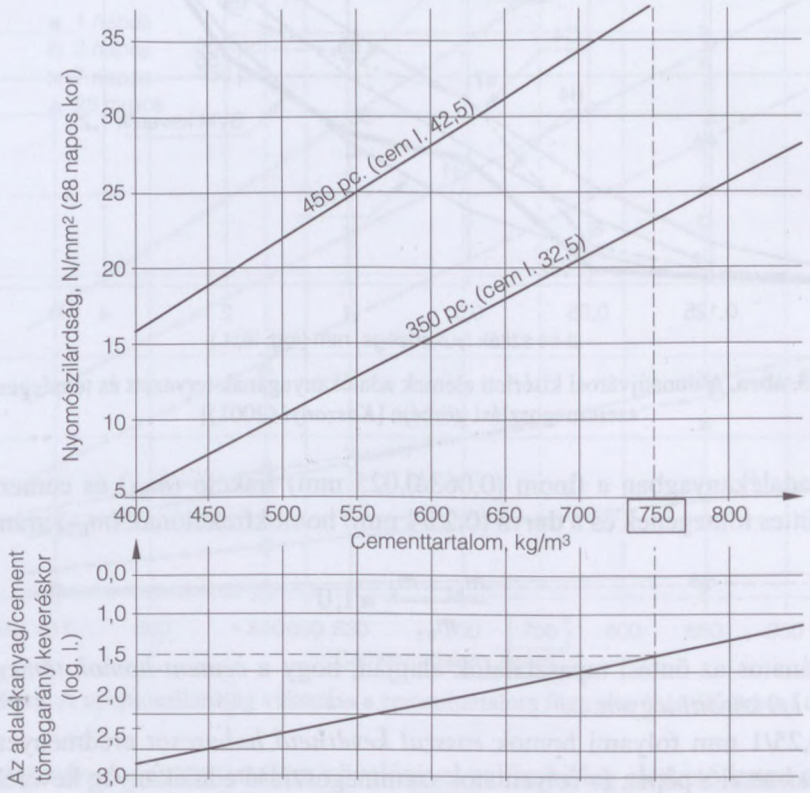
$$x = \frac{m_w}{m_c}$$

$$x_m = \frac{m_w}{m_c + m_h}$$

módosított víz-cement tényezővel kell számolni az adalékanyag nagy fajlagos felületének figyelembevételével.

– A keverővíz meghatározásánál a gipsz zsaluzóelemek nedvszívó képességét 25–28 tömeg% értékben javasolt felvenni.

Tervezési nomogram dermesztett betonok összetételének meghatározására. Korábbi vizsgálatok eredményeinek összefoglalása és szintézise eredményeképpen dr. *Kászonyi* Gábor a dermesztett betonok speciális tulajdonságait is figyelembe vevő tervezési nomogramot állított össze, melyet a *18.6. ábra* mutat.



18.6. ábra. Nomogram dermesztett betonok összetételének tervezéséhez [*Kászonyi* (2001)]

A nomogram alkalmas számított – szilárdságilag szükséges – cementtartalom (m_c) ismeretében, adott cementminőség esetén, a nyomószilárdság előrebecslésére, illetve az adalékanyag – az önthetőség szempontjából megfelelő – tömegének közelítő meghatározására.

18.6.2. A szilárdsági jellemzők

Dr. *Kászonyi* Gábor laboratóriumi mérések alapján kimutatta, hogy a vízelszívás következtében a beton szilárdulási folyamata jellegében azonos a vízzáró zsaluzatban készített beton szilárdulási folyamatával.

A vízelszívás (gipszzsaluzat dermesztő) hatását a nyomószilárdság, illetve a hajlító-húzó szilárdság nagyságára és időbeli alakulására a cementfajták befolyásolják.

A nyomószilárdság és időbeni változása

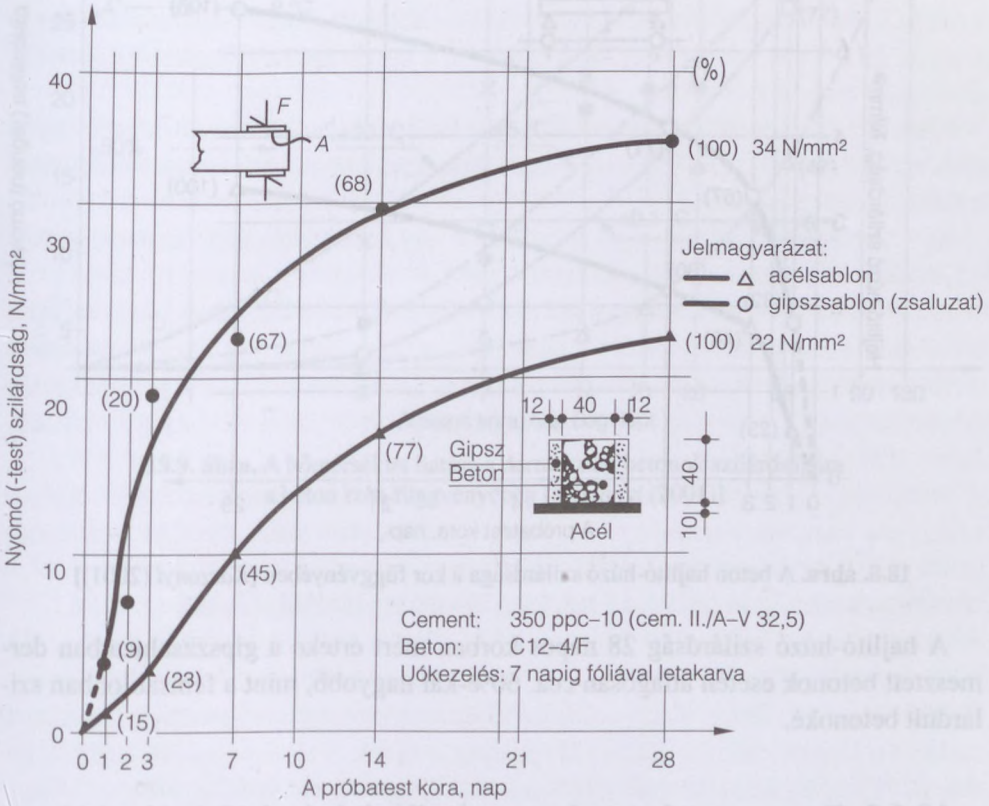
A nyomó(test)szilárdság átlagos értéke 28 napos korban (f_c):

– Acélsablonban készített testeken 21,0 MPa,

– Gipszzsaluzatba öntött testeken 34,0 MPa volt.

Megjegyzés: tervezett betonminőség: C12, cement: váci 350 ppc-10 (CEM. II./A-V32,5), szilárdulási hőmérséklet 20 ± 2 °C.

A szilárdulás ütemét acél-, illetve gipszzsaluzatba öntött testeken a *18.7. ábra* szemlélteti.



18.7. ábra. A beton nyomószilárdsága a kor függvényében [*Kászonyi* (2001)]

A gipszzsaluzatban dermesztett betonok szilárdulása lényegesen gyorsabb a fémsablonba öntött betonokénál. A nyomószilárdság 28 napos korban mért értéke a dermesztett betonok esetében átlagosan kb. 50%-kal nagyobb, mint a fémsablonban készült betonoké.

A hajlító-húzó szilárdság értéke és időbeni változása

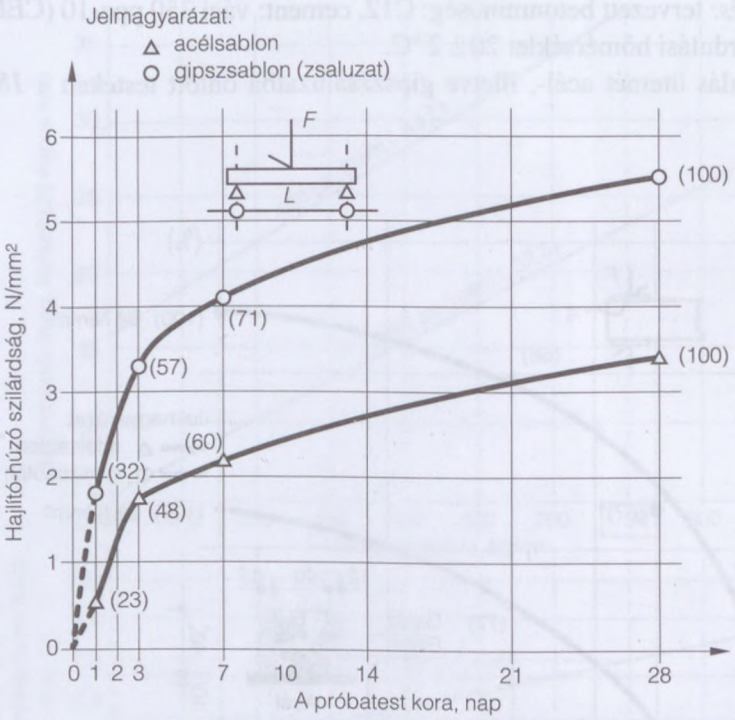
A hajlító-húzó szilárdság átlagos értéke 28 napos korban ($f_{ct,fl}$):

– Acélsablonban készült betoné 3,51 MPa;

– Gipszzsaluzatba öntött betoné 5,60 MPa volt.

Megjegyzés: tervezett betonminőség: C12, cement: váci 350 ppc-10 (CEM. II./A-C32,5) szilárdulási hőmérséklet 20 ± 2 °C.

A szilárdulás ütemét acél-, illetve gipszzsaluzatba öntött testeken a *18.8. ábra* szemlélteti.



18.8. ábra. A beton hajlító-húzó szilárdsága a kor függvényében [*Kászonyi* (2001)]

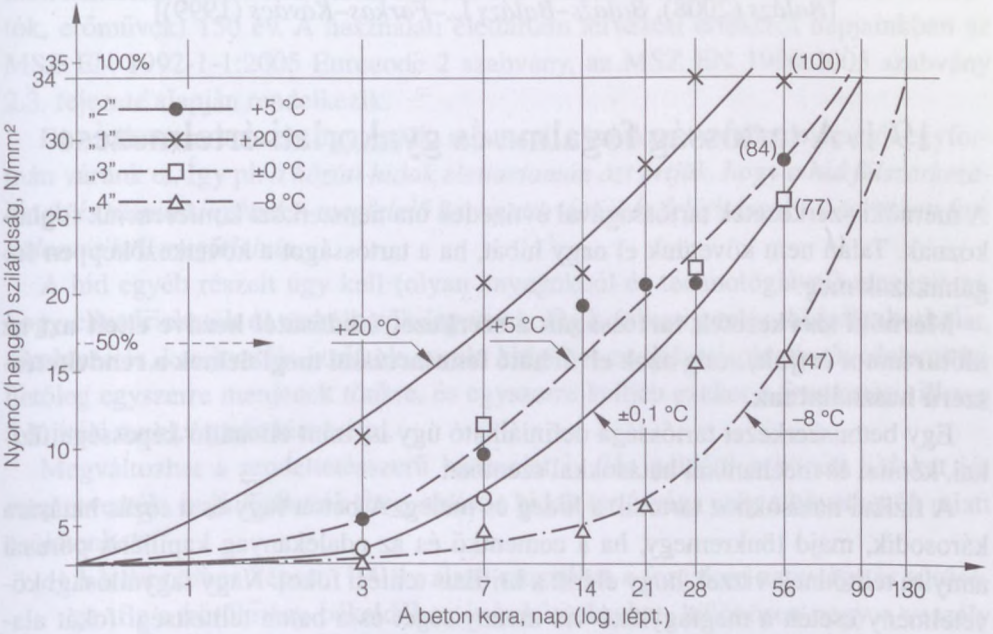
A hajlító-húzó szilárdság 28 napos korban mért értéke a gipszzsaluzatban dermesztett betonok esetén átlagosan cca. 60%-kal nagyobb, mint a fémsablonban szilárdult betonoké.

18.6.3. Dermesztett betonok nyomószilárdságának alakulása hideg időben készített szerkezetek esetén

A hideg hőmérséklet hatását a dermesztett betonok szilárdulási ütemére a *18.9. ábra* szemlélteti, részletes vizsgálatát a kivitelezés igényei határozták meg (Dómkőtár, Pécs).

Az 56 napos korban mért szilárdságok aránya (kerekítve) +20 °C hőmérsékleten tárolt testeknél 100%, +5 °C esetén 84%, ±0 °C esetén 77%, –8 °C hőmérsékleten 4%. Mivel a kizsaluzás (kiállványozás) általában a végszilárdság 50–60%-ának elérése után végezhető el, így +20 °C esetén 7 napos, +5 °C-nál 14 napos, +0 °C-

nál 28 napos, míg –5 °C-nál csak 56 napos korban végezhető el. Megjegyzés: A hideg időben végbemenő betonszilárdulási folyamatok kutatásával *Balázs* (2007) foglalkozott.



18.9. ábra. A hőmérséklet hatása a dermesztett betonok szilárdságára a beton kora függvényében [*Kászonyi* (2001)]

19. A tartósság követelménye és növelésének módszerei

[*Balázs* (2008), *Balázs–Balázs* L.–*Farkas–Kovács* (1999)]

19.1. A tartósság fogalma és gyakorlati értelmezése

A mérnöki szerkezetek tartósságával évtizedek óta nemzetközi konferenciák foglalkoznak. Talán nem követünk el nagy hibát, ha a tartósságot a következőképpen fogalmazzuk meg:

Mérnöki szerkezetek tartósságán a szerkezet átadásától kezdve eltelt azt az időtartamot értjük, amíg azok elvárható fenntartással megfelelnek a rendeltetésszerű használatnak.

Egy betonszerkezet tartóssága definiálható úgy is, mint ellenálló-képessége fizikai, kémiai és mechanikai hatásokkal szemben.

A fizikai hatásokhoz tartozik a hideg és meleg. A beton fagy és a sózás hatására károsodik, majd tönkremegy, ha a cementkő és az adalékanyag kapilláris pórusai annyira telítődnek vízzel, hogy elérik a kritikus telítési fokot. Nagy fagyállósági követelmény esetén a megfagyható víz mennyiségét és a beton telítettségi fokát alacsony szinten kell tartani.

A betonban kialakuló hidrosztatikus nyomás és a kritikus telítési fok eléréséhez szükséges vízfelvétel sebességét lényegesen csökkenteni lehet a betonba mesterségesen bevitt, finom eloszlású légbuborékok segítségével.

A fagy hatását jelentősen növeli, ha a betont egyidejűleg sózzák.

Kémiai hatás lehet azáltal, hogy savak vagy savas oldatok a betonba hatolva oldják a cementkő alkotóit, vagy a cementkő alkotóival reakcióba lépve térfogat-növekedést okoznak. Kémiai hatás az is, ha a betonba kevert alkotók később egymással reakcióba lépnek, például alkáli-adalékanyag reakció. A tartósságot ténylegesen befolyásoló kémiai hatások: a téli sózás, a levegő megnövekedett SO_2-, NO_2-, CO_2-tartalma. A kémiai reakciók tehát a beton alkotóitól függnek. Nem szabad megfeledkezni arról, hogy a kémiai reakciókhoz elegendő mennyiségű víz kell, amely kívülről a kapillárisokon át jut be a betonba.

Mechanikai hatás, például a betonfelület koptatása (pl. a hordalék mozgása, a közlekedés koptató hatása), járművek ütközése, földrengés, árvíz.

A környezeti hatások, amelyek fizikaiak, kémiaiak, mechanikaiak egyaránt lehetnek, osztályba sorolásáról az MSZ 4798-1:2004 szabvány alapján könyvünk 22. fejezetében részletesebben írunk.

A tartósság követelményét tehát ugyanolyannak kell tekinteni, mint a szilárdsági és alakváltozási követelményeket.

Bár próbálkoznak a tartósság számszerű jellemzésével, szívesebben beszélnek élettartamról, ameddig a szerkezet rendeltetésszerűen használható. Ezt azonban számszerűen megfogalmazva nem találtuk. A szakemberek között a következő számok ismertek. Közúti híd, vasúti híd 100 év; vízépítési nagylétesítmények (duzzasztók, erőművek) 150 év. A használati élettartam tervezési értékéről napjainkban az MSZ EN 1992-1-1:2005 Eurocode 2 szabvány, az MSZ EN 1990:2005 szabvány 2.3. fejezete alapján rendelkezik.

De az élettartamot sem úgy értjük, mint amit a szerkezet minden elemétől egyformán várunk el. Így pl. *a közúti hidak élettartamán azt értjük, hogy a híd felszerkezetének és alépítményének – megfelelő karbantartással és felújítással – a tervezett forgalomra kell megfelelnie.*

A híd egyéb részeit úgy kell (olyan anyagokból és technológiával) megépíteni, hogy ellenőrizhetők és cserélhetők legyenek. Ezek (vízszigetelés, hídpályaburkolat, vízelvezetés, kerékvetők, korlátok, saruk, hídpálya-csatlakozások, rézsűvédelem) lehetőleg egyszerre menjenek tönkre, és egyszerre kelljen ezeket a fenntartási, illetve felújítási munka során kicserélni.

Megváltozhat a rendeltetésszerű használat is. Ha például a közúti hidakat jól megtervezték, és jól építették meg, akkor a hidak tartóssága még a következők miatt csökkenhet:

a) A tervezetthez képest (100 év alatt) megnőhet a forgalom nagysága és sűrűsége. Ez a körülmény békeidőben is bekövetkezhet, különösen nagy a veszély háború esetén.

b) A híd állékonysága, stabilitása támaszpontsüllyedések, támaszelfordulások, földrengés stb. miatt csökkenhet.

c) A külső körülményekben változás állt be. Például eddig nem sózták a hidat, majd sózzák. Ez magával hozhatja, hogy az addigi betonfedés már nem elegendő. Továbbá a beton, amely eddig fagyálló volt, nem fagy- és sózásálló. A külső körülményekhez tartoznak a légköri szennyeződések. Például olyan ipart telepítenek, vagy olyan az út forgalma, hogy a légköri szennyeződések megnőnek.

d) Új építőanyagokat (pl. műanyag saruk, gőzölt beton, légpórusos beton), új építési technológiákat (pl. szabad szerelés, szabadkonzolos hídépítés, előtolásos hídépítés) alkalmazunk, melyek éppen újdonságuknál fogva rendszeres megfigyelést igényelnek, mert tartósságukra nincs biztos tapasztalat.

Amikor tehát a betonanyagú szerkezetek tartósságáról állást foglalunk, akkor bonyolult feladatra vállalkozunk. Mára azonban már elég sok ismeretanyag gyűlt össze. Ezek alapján adunk tanácsot tartós szerkezetek építéséhez.

Napjainkra az az egyértelmű nézet alakult ki, hogy *tartós, korrózionak ellenálló vasbeton szerkezeteket kell építeni, és azokat a korrózió ellen védeni kell.*

Az egyik álláspont szerint a leghatásosabb és leggazdaságosabb védekezés a korrózió ellen a lehető legtömörebb beton készítése és a betontechnológiai követelmé-

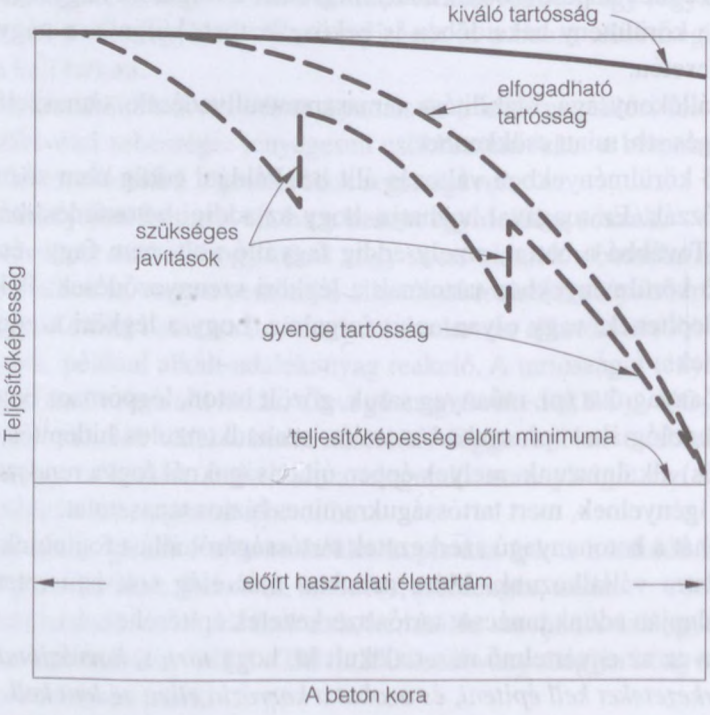
nyek szigorú betartása. E követelmény felöleli a beton anyagai és összetétele szakszerű kiválasztását, a beton helyes előállítását, utókezelését és megbízható ellenőrzését beépítés előtt és után, a betonfedés célszerű megválasztását, a szerkezet szakszerű fenntartását. Ezt elsődleges megelőző védelemnek nevezzük [*Balázs–Kovács* (1990)].

A másik álláspont szerint a külön nem védett betonba a korróziót okozó anyagok így is behatolnak, tehát valamilyen módon meg kell gátolni, hogy ez bekövetkezzék (védőbevonat, impregnálás stb.). Ezt másodlagos megelőző védelemnek nevezzük. Természetesen ennek az álláspontnak a képviselői sem állítják, hogy ebben az esetben nincs szükség tömör betonra.

A reális helyzet az, hogy az agresszivitás mértékétől függően kell megválasztani a korrózió elleni védekezés módját. *Elsődleges megelőző védelem mindig kell, másodlagos megelőző védelem korrózionak* (pl. sózás, légszennyezés) *erősebben kitett szerkezeti elemek esetén kell.*

A megépített szerkezet teljesítőképessége a használat során mindenképpen csökken, amit igyekezünk a felújításokkal, javításokkal mérsékelni. Ezt a folyamatot *Sommerville* [*Sommerville* (1986), *Ujhelyi* (1996)] a *19.1. ábra* szerint jellemezte.

A felújítás a tartósságnak nélkülözhetetlen része. Ezt *másodlagos megszüntető védelemnek* (javítás) nevezzük.



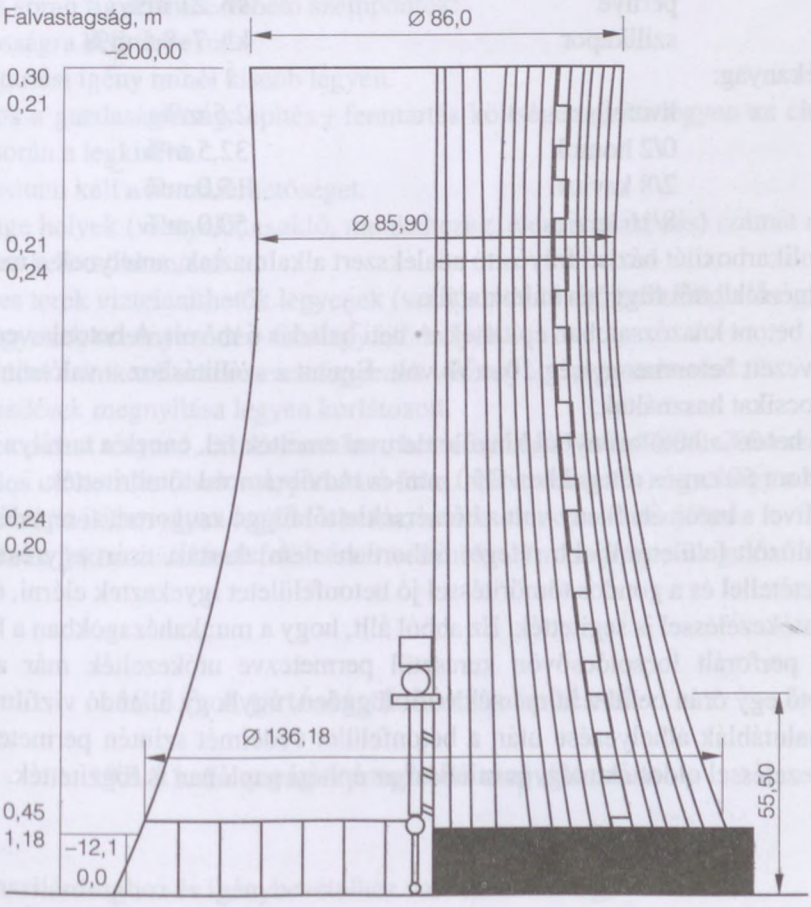
19.1. ábra. A betonszerkezetek teljesítőképességének a csökkenése a korral [*Sommerville* (1986), *Ujhelyi* (1996)]

Gyakran szükség van a szerkezetek teherbírásának a növelésére, mert a megváltozott terheket az eredeti szerkezet nem tudja hordani. A meghibásodás is lehet olyan mérvű, hogy csak a lecsökkent teherbírás pótlásával felel meg a szerkezet a rendeltetésszerű használatnak. Ezt együtt a szerkezet megerősítésének nevezzük.

19.2. Niederaußemi hűtőtorony

[*Budnick–Starkmann* (1999)]

Niederaußemben 950 MW-os erőműblokkhoz új hűtőtornyot építettek. Magassága 200 m, felső átmérője 86 m, alsó átmérője 136 m. A hűtővíz mennyisége 91 000 m^3/h. Ezáltal – építése idején – ez a világ legnagyobb és legmagasabb hűtőtornya. A hűtőtorony vázlatát a *19.2. ábra* szemlélteti. Az összes beépített beton mennyisége 32 000 m^3, amelyből a nagy teljesítőképességű (saválló) beton a hűtőtoronyban 17 650 m^3 volt.



19.2. ábra. A niederaußemi hűtőtorony [*Budnick–Starkmann* (1991)]

A beépített betonacél mennyisége 3650 tonna volt.

A saválló speciális betont elméletileg és laboratóriumi szinten a berlini egyetemen dolgozták ki. A hűtőtoronyhoz – széles körű laboratóriumi kísérletek alapján – SRB (säureresistenter Beton) 85/35 jelű betont választotta. A B85 (az előírt szilárdsági osztály 15 cm élhosszúságú kockán) nagy törőszilárdságú, sav- és szulfátálló beton környezeti feltételek miatt szükséges 85 MPa szilárdsági osztályát jelenti, a 35 MPa a statikailag elégséges szilárdsági osztály.

Ha csak a szilárdságot vették volna alapul, akkor B35 jelű beton (B a 15 cm élhosszú kockán előírt követelmény) elég lett volna. A hűtőtornyot azonban nehéz vizsgálni, javítani, épp ezért olyan tartós betonból építették, amelynek nincs fenntartási igénye.

A laboratóriumi kísérletek alapján, amelyet munkahelyi kísérletekkel is alátámasztottak, az alábbi *betonösszetételt* írták elő:

kötőanyag:

CEM I 42,5 HS/NA jelű cement	250 kg/m^3
pernye	kb. 21 m%
szilikapor	kb. 7–8,5 m%

adalékanyag:

kvarcliszt	2,5 m%
0/2 homok	32,5 m%
2/8 kavics	15,0 m%
8/16 kavics	50,0 m%

Polikarboxilát bázisú folyósító adalékszert alkalmaztak, amelynek a mennyiségét a hőmérséklettől függően változtatták.

A betont kúszózsaluban építették. A heti haladás 6 m volt. A betonkeverő 1 m^3-es, a tervezett betonmennyiség 10 m^3/h volt. Emiatt a szállításhoz – valószínűleg – mixerkocsikat használtak.

A betont a hűtőtoronyból kinyúló daruval emelték fel, ennek a tartálya 1,5 m^3-es. A betont 50 cm-es rétegekben Ø50 mm-es rúdvibrátorral tömörítették.

Mivel a beton érzékeny volt a hőmérséklettől függő zsugorodási repedésekre, és a kizsaluzott felületre újabb réteget felhordani nem akartak, ezért egyrészt a betonösszetétellel és a gondos tömörítéssel jó betonfelületet igyekeztek elérni, és ezt gondos utókezeléssel is segítették. Ez abból állt, hogy a munkahézagokban a beton felületét perforált locsolócsövön keresztül permetezve utókezelték már a készítést követő egy órán belül a hőmérséklettől függően, úgyhogy állandó vízfilm jött létre. A zsalutáblák áthelyezése után a betonfelület védelmét szintén permetező nedves utókezeléssel oldották meg, és mindezt az építési naplóban is rögzítették.

19.3. Az elsődleges megelőző védelem

19.3.1. A tartósság növelése szabályozással

A tartós beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetekbe olyan anyagok tervezhetők, illetve építhetők be, amelyeknek megfelelőségét alkalmassági engedély vagy alkalmassági vizsgálatokon alapuló szakintézeti szakvélemény igazolja.

A vasbeton anyagaira vonatkozó követelményeket szabványok tartalmazzák. (Napjainkban az MSZ 4798-1:2004 betonszabvány.)

A beton- és építéstechnológiára vonatkozó követelményeket, vizsgálati módszereket szintén szabványok tartalmazzák, és azokat a szerződő feleknek be kell tartaniuk.

19.3.2. A tartósság növelése tervezéssel (vasbeton)

A tervezés során figyelembe vehető szempontok:

- Tartósságra kell tervezni.
- Fenntartási igény minél kisebb legyen.
- Pontos a gazdaságosság: építés + fenntartás költsége együtt legyen az élettartam során a legkisebb.
- Biztosítani kell a hozzáférhetőséget.
- Gyenge helyek (víznyelő, csukló, munkahézag, elemcsatlakozás) számát minimumra kell csökkenteni.
- Üreges terek vízteleníthetők legyenek (szellőztethetőség, hozzáférhetőség).
- Ne legyenek szennyeződés- és vízgyűjtő helyek.
- A földdel érintkező szerkezetek legyenek viszonylag nagy méretűek.
- A repedések megnyílása legyen korlátozott.
- A víz-cement tényező, cementtartalom, betonfedés az MSZ 4798-1:2004 szerint.
- Gondos utókezelés (zsaluzat, párazáró fólia, nedvesen tartás) úgy, hogy a beton felülete közelében olyan legyen a beton, mint a szerkezet belsejében.
- Sózásnak fokozottan kitett felületeket védeni kell (másodlagos megelőző védelem).

19.3.3. A tartósság fokozása építéssel

19.3.3.1. Az anyagok megfelelő megválasztása

Cement:

- Betonszilárdsághoz és igénybevételhez való alkalmasság.
- Vastag falú szerkezetben a megfelelő hidratációhőjű cement.

– A cement repedésérzékenysége az őrlési finomság függvénye.
– A kötött kloridion nem okoz acélbetét-korróziót.
– Olyan cementet kell választani, amelyiknek legnagyobb a kloridion-megkötő képessége. Csak a C_3A és C_4AF köt meg kloridiont. Esetenként a cementbe adagolt kiegészítő anyagokkal érhető el a megkötő képesség növelése. A szabályzatok korlátozzák a felhasznált anyagok kloridion-tartalmát. Jégtelenítő sózás is korróziót okozhat.

Adalékanyag:
– Ellenőrizni kell az adalékanyag-alkáli korrózióveszély lehetőségét.
– Az adalékanyag mosott és osztályozott legyen.
– Az adalékanyagot szennyeződésmentesen kell tárolni, különösen védeni kell a szerves anyagoktól (falevél, fű).

Kiegészítő anyagok:
– A gyártmányismertetőben foglaltakat be kell tartani.

19.3.3.2. A tartósság fokozása tömör betonnal

Ahhoz, hogy az acélbetét korróziója bekövetkezzék, három tényező együttes teljesülése szükséges:
– A beton pH-ja az acélbetét környezetében ≤ 9, vagy $pH \leq 9$ és kloridion van.
– A beton elektromosan vezetőképes (ez a víztartalomtól függ).
– Oxigén jut az acélhoz.

Megelőzéshez kell:
tömör beton,
megfelelő betonfedés,
légbuborékos beton.

Tömör beton:
időálló beton,
maximum 0,4–0,45 víz-cement tényező (képlékenyítő-folyósító adalékszerrel ez csökkenhet),
jól bedolgozható beton (a földnedves betonkonzisztenciát csak kivételes esetekben szabad használni),
gondos utókezelés,
tömörség fokozása, pl. szilikaporral.

19.3.3.3. A tömörség fokozása CSH-ot (kalcium-szilikát-hidrátot) létrehozó hidraulikus pótlékokkal

Ezek:

– Porszénhamu (pernye), nád, cukornád hamuja,

– Szilikapor.

Utóbbi ferroszilícium, fémszilícium gyártásakor keletkező, ~1μm átmérőjű, 12–20 m^2/g fajlagos felületű, 85–98% SiO_2 tartalmú, amorf szerkezetű, gömb alakú por.

Hatása:

– Friss betonra:
stabilitás növelése,
szép betonfelület,
csökken a kivérzési hajlam,
javítja a tixotróp tulajdonságokat;

– Megszilárdult betonra:
kémiai hatás: CSH-képződés, szilárdság növekedése,
fizikai hatás: töltőanyag,
csökkenti a porozitást.

19.3.3.4. A tartósság növelése légbuborékos betonnal

A légbuborékképző adalékszerrel létrehozott 20–300 μm átmérőjű és legfeljebb 0,22 mm távolsági tényezőjű légbuborékok növelik a fagy- és sózásállóságot (MSZ 4798-1:2004)

19.3.4. Beton- és építéstechnológiai utasítás tartalma

A tervező a terven feltünteti a beton jelét.

A betontechnológus a beton jeléből kiindulva, figyelembe véve a kivitelező felszereltségét, elkészíti a beton- és építéstechnológiai utasítást.

A beton- és építéstechnológiai utasításnak tartalmaznia kell:

– A betonnal szemben támasztott követelményeket;

– A beton alkotóival szemben támasztott követelményeket;

– A beton összetételét tömegre és térfogatra;

– A próbakeverés során mérendőket;

– A beton keverésére, szállítására és bedolgozására vonatkozó részletes utasítást;

– A beton eltarthatóságának mérési módját;

– Az utókezelés módját és időtartamát;

– A kizsaluzás, kiállványozás időpontját;

– A betonozási hibák javítását.

Nagy felületű, vastag falú szerkezet esetében még az alábbiakat kell előírni:

– A munkahézagok helyét és kialakítását;
– Vastag falú szerkezetekben a hőmérsékletmérés helyét és módját;
– A hőmérséklet-szabályozásra vonatkozó követelményeket.

19.3.5. Minőség-ellenőrzés

Mára már kialakult a minőség-ellenőrzés rendje, amit a vonatkozó szabályzatok elő is írnak.

A minőség-ellenőrzés két fő részből áll:

– A vizsgálatokból és
– A vizsgálati eredmények alapján készített szakvéleményből.

A vizsgálat típusai:

– Alkalmassági vizsgálatok,
– Saját ellenőrző vizsgálatok,
– Külső fél ellenőrző vizsgálatai.

Az alkalmassági vizsgálatok a beton anyagainak és szükség szerint a betonkészítés technológiájának a tervezett felhasználási célra való alkalmasságát ellenőrzik.

Saját ellenőrzés az anyaggyártó, a kivitelező vagy azok megbízottainak vizsgálata. Célja annak a megállapítása, hogy az építőanyagok, a beton minősége megfelel-e a követelményeknek. Továbbá, hogy az építőanyagok tárolása, bedolgozása és a kivitelezés megfelel-e az építési szerződésnek.

Külső ellenőrzés a beruházó megbízásából végzett ellenőrzés, amely a saját ellenőrzésben foglaltakon kívül a személyi és felszereltségi feltételek ellenőrzésére is kiterjed. Ennek mértékét a beruházó szabja meg.

Az anyagokra (pl. cement, acél) vonatkozó követelményeket általában szabványokban és új anyagok esetén a termékismertetőben rögzítik.

A saját ellenőrzéshez a követelményrendszert a beton- és építéstechnológiai utasítás részeként adják meg. Ebben rögzíteni kell az alábbiakat:

– Előírt vizsgálatok,
– Előírt értékek,
– Vizsgálati módszer,
– Vizsgálat gyakorisága,
– Vizsgálatot végzők,
– Próbavétel helye és módja,
– Megjegyzés, szükség szerint.

Minimálisan mérni kell:

a konzisztenciát,
a szilárdságot, a testsűrűséget.

Különleges követelmények:
vízzáróság,
kopásállóság,
fagyállóság,
sózásállóság.

Gyakran előfordul, hogy más a beton gyártója, szállítója és felhasználója (kivitelező). Ebben az esetben a betongyár és a szállító külön-külön felel az átadott betonért. A kivitelező pedig felel a létesítményért. Az a szerencsésebb megoldás, ha a betongyárnak vannak szállítóeszközei is. A kivitelezőnek érdekében áll az átvett beton szigorú ellenőrzése. A betonszállítmányt visszautasítani azonban csak a beton konzisztenciája és légtartalma (esetleg télen a friss beton hőmérséklete) alapján tudja. A betongyárnak is tanúsítania kell a beton minőségét. De szükség van a bizalomra is, mert hiszen a beépített beton minősége csak később derül ki.

A betontechnológiai utasítás készítéséhez még az alábbiakat jegyezzük meg:

Még a döngölt beton időszakában kialakult az a nézet, hogy minél kevesebb vizet tartalmaz a beton, annál szilárdabb lesz. Ezzel vele járt az a nézőpont is, hogy földnedves betont kell lehetőleg készíteni, mert a képlékeny beton nem megfelelő szilárdságú. Csak példaként említjük az 1950-es években épített kaposvári Kapos-hidat, amelynek helyszínen készített feszített beton tartóit annyira száraz betonból készítették, hogy a vibrációs időt (zsaluvibrátort) 30–60 percben írták elő.

Napjainkra a mind karcsúbb szerkezet és a sűrű vasalás jellemző, amit már nem lehet földnedves betonból megbízhatóan előállítani. *A konzisztencia a szilárdság szempontjából elvesztette jelentőségét,* hiszen *Abrams* óta (1918) tudjuk, hogy azonos körülmények között a *szilárdság csak a víz-cement tényezőtől és a tömörítés mértékétől függ.* A konzisztencia csak a bedolgozhatóság szempontjából játszik szerepet. *Ezzel a vasbeton szerkezetek területén a földnedves beton szükségtelenné vált. Jelenleg az a törekvés, hogy jól bedolgozható betont állítsunk elő,* addig növelve a beton lágyságát a megfelelő betonösszetétellel, konzisztenciajavító adalékszerrel, amíg csak lehetséges (ne legyen szétosztályozódás, kivérzés, ülepedési repedés stb.). *A konzisztencia előírásával és rendszeres ellenőrzésével a minőség egyenletességét igyekszünk biztosítani.* Ezért a nem megfelelő konzisztenciájú transzportbetont a munkahely utasítsa vissza. Ha a leszállított beton konzisztenciája nem megfelelő, akkor azt nem víz hozzáadásával, hanem pl. folyósító adalékszerrel kell javítani (ellenőrzött módon).

A saját és külső minőség-ellenőrzés csak arra terjed ki, hogy a beépített beton megfelelhet-e az előírt követelményeknek (minősítő vizsgálat), ha a próbatesteket szabványosan tárolják. A beépített beton tulajdonságai (elsősorban szilárdulása) a szabványostól lényegesen eltérhetnek (pl. hideg, meleg időjárás). Ha a szerkezet betonjának tényleges tulajdonságait is ellenőrizni szeretnénk, akkor a betontechnológiai utasításban a tájékoztató betonvizsgálatokat (a próbatesteket az építményen tárolják), illetve roncsolásmentes szilárdságvizsgálatot is előírhatunk. Az is előfordult

már, hogy a beton a hibás minősítővizsgálat alapján nem felelt meg (mert nem szabványosan tárolták a betont), és roncsolásmentes vizsgálat igazolta a szerkezet betonjának megfelelő voltát. A tájékoztató vizsgálat alkalmas a kizsaluzás, kiállványozás időpontjának megbecslésére. Azonban mind ezt, mind a roncsolásmentes vizsgálatokat nagy szakértelemmel kell használni a szerkezet betonjának minősítése esetén.

19.3.6. Üzemeltetés, fenntartás

Ahhoz, hogy egy beton, vasbeton, feszített vasbeton építmény terv szerinti élettartama során feladatát maradéktalanul elláthassa, szükség van használatának és fenntartásának szabályozására.

Az *üzemeltetési utasítás* építménytípusonként tartalmazza például
- a túlterhelés kizárását,
- az űrszelvényt,
- a hídhasználat korlátozását.

A *fenntartás-karbantartás* magában foglalja pl. hidak esetében:
- a tisztán tartást,
- a hó eltakarítását,
- a jégtelenítő sózás módszerét,
- tél után a hídpálya lemosását,
- víznyelő tisztítását,
- sérült dilatáció, korlát cseréjét,
- tömeg-, sebesség- és magasságkorlátozó táblák ellenőrzését,
- rézsű és háttöltés ellenőrzését,
- uszadékok ellenőrzését,
- árvíz idején a műtárgy figyelését,
- folyómeder rendben tartását,
- jégtörő robbantás hatásának ellenőrzését.

19.4. Másodlagos megelőző védelem főbb részei

19.4.1. Általános szempontok

Erre akkor van szükség, ha az elsődleges védelem nem elegendő a szerkezetnek az adott hatások elleni védelmére.

Ezeket a védekezési módokat általában már az eredeti tervek tartalmazzák, amennyiben ismertek a szerkezetet érő hatások. Sok esetben azonban utólagosan rendelik el ezeket, és ilyenkor olyan megoldásokat kell találni, amelyek a meglévő alaphelyzet igényeit és lehetőségeit veszik figyelembe.

Ha az eredeti tervezés tartalmazza a másodlagos megelőző védelmi megoldásokat, akkor az alapszerkezet kialakításánál már meg lehet valósítani a tartós kapcsolatok módjait. Ez tekinthető ideális állapotnak.

A másodlagos megelőző védelem kialakítására sok esetben a szerkezet sokévi funkciója után egy esetleges használati technológiaváltás kapcsán kerül sor. Ez a feladat igényli a legnagyobb körültekintést, mivel a szerkezet az előző technológia során már valamilyen mértékben szennyeződhetett, de mindenképpen a korosodásával együtt járó jelenségek miatt más kapcsolódási lehetőségei vannak, mint az új szerkezeteknek.

Az új funkció körülményei ütközhetnek a régivel, s ilyenkor rövid üzemelés után problémák jelentkezhetnek.

Ezért nagyon fontos az épületek *szerkezeti és anyagtani diagnosztikája,* mert csak ennek alapján lehet felmérni a tényleges meghibásodások veszélyeit.

Alapszabályként kell kezelni, hogy másodlagos megelőző védelmet csak anyagtanilag, szerkezetileg és funkcionálisan is jól ismert beton- és vasbeton műtárgyakon szabad kialakítani.

19.4.2. A betonfelület előkészítése, ellenőrzése

Új betonszerkezet esetén is ellenőrizni kell, hogy alkalmas-e a védőanyag fogadására. Szilárdsági-kapcsolati szempontból akkor tekintjük megfelelőnek, ha a beton tapadó-húzó szilárdsága legalább 1,5 MPa.

Régebbi szerkezet másodlagos megelőző védelme esetén a kapcsolat felületi hibáit el kell távolítani, és a felületet meg kell tisztítani.

19.4.3. A felületvédelmi rendszerekkel szemben támasztott követelmények

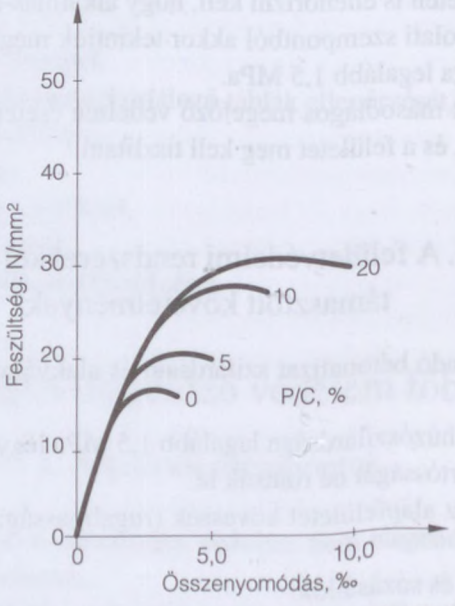
- A rendszert fogadó betonaljzat szilárdsági és alakváltozási jellemzői legyenek megfelelőek.
- A beton tapadó-húzószilárdsága legalább 1,5 MPa legyen.
- A betonaljzat tartósságát ne rontsák le.
- Tulajdonságai az alapfelületét kövessék (rugalmassági modulusok egyeztetése stb.).
- Legyenek fagy- és sózásállók.
- Legyenek öregedésállók, térfogatállandók, alkáliállók, vízállók, vízáteresztők, vízgőzáteresztők.
- CO_2 és SO_2 behatolását gátolják meg.
- Legyenek összeférhetőek.

– Legyenek könnyen bedolgozhatók.
– Legyenek kellő bedolgozhatósági idejűek.
– Széles hőmérséklet-tartományban legyenek bedolgozhatók.
– Szükség szerint fej felett is bedolgozhatók legyenek.
– A rendszer alkalmasságát a kivitelezőnek igazolnia kell.

19.4.4. Felületvédelmi rendszerek anyagai

A beton felületét védeni lehet a külső hatások ellen például epoxigyantával. Ennek előnyei mellett hátránya az, hogy lezárja a beton kapilláris pórusait. Ezenkívül a hőtágulási együtthatója többszöröse a betonénak. Ezek miatt a védőréteg leválhat. Ha a gyanta térhálósítója amin típusú, akkor a bevonat rideg, a bevonat a betonnal együtt megreped. Amid típusú térhálósítóval a gyanta rugalmas-képlékeny, lesz repedésáthidaló képessége.

A legjobban bevált a polimerdiszperzióval módosított cement kötőanyagú védőanyag (PCC-rendszer). A műanyagokat általában 5–10, esetleg 15%-ban adagoljuk, ami a cement tulajdonságait kedvezően befolyásolja. De a cementpép lineárisan rugalmas $\sigma - \varepsilon$ diagramjait rugalmas-képlékennyé változtatja. Ezáltal a bevonatnak repedésáthidaló képessége lesz (*19.3. ábra*)



19.3. ábra. PCC rendszer feszültség-nyúlás diagramja [*Balázs* (2008)]

19.5. Másodlagos megszüntető védelem

Ez a meghibásodott beton javítását és védelmét jelenti.

19.5.1. A hibás részek bontása

Leggyakoribb a bontókalapácsos módszer.

Nagyon fontos dolog, hogy a hibás rész nyomai se maradjanak meg a betontesten, tehát inkább az egészséges részből hiányozzék. Ugyanekkor fontos, hogy jelentős túlvésések ne keletkezzenek.

Az eltávolított betonrészek geometriáját mindemellett sokszor úgy kell kialakítani, hogy később a betonpótlás egyszerű legyen és a levésett szerkezet geometriai megformálása legyen azonos, de legalább hasonlítson az eredetihez.

Az eltávolított rész formai kialakítását az előbbiekhez igazodva a következőképpen kell megoldani:

- Az eltávolított rész határozott vonalú legyen, amit az egészséges részből lekerekítéssel, pótlással kell kialakítani.
- Az eltávolított rész határozott lépcsősen csatlakozzék a maradóhoz. Nem szabad hagyni nulla vastagságra kifutó részeket, mert ott a javítóanyag csatlakozása a régihez nem lesz tartós.
- Ahol lehet, az eltávolított rész szélei legyenek merőlegesek a javítandó felületre. Amennyiben jelentős műszaki akadálya nincs, legyenek rajta olyan részek, ahol ez az irány a betontest felé bővülő üreget képez (ún. fecskefarkú kiképzésű).
- Az eltávolított rész az acélbetétek mögé érjen úgy, hogy azt a betonpótló anyag teljes egészében körbe tudja fogni. Ez akkor is indokolt, ha a hibás rész mélysége nem éri el az acélbetét belső felületének mélységét. Ebből engedményt tenni csak alapos műszaki megfontolással szabad. Általában, ha a betonszerkezetben szennyező anyag nincs, és az acélbetét korróziója csak a külső felületen indult meg, akkor meg szabad engedni, hogy a bontást csak a betonacél külső félkerületén végezzék el. Ilyenkor azonban bontás közben szigorúan ellenőrizni kell a beton karbonátosodási mélységét. Ha a karbonátos rész közelíti az átmérő felét, akkor ezt az engedményt nem szabad megadni.
- Az acélbetétet – a hibás részen – lehetőleg ne távolítsuk el, ha ezt valamilyen különleges egyéb ok nem indokolja. A későbbi pótlás nem egyenértékű az eredetileg jól befogott acél betonacél szerepével. Eltávolítani acélbetétet csak akkor szabad, ha az jelentősen korrodált állapotú, ezért mindenképpen pótolni kell, és a kétféle acél már gátolja a korrekt helyreállítást.

– Ha sor kerül az acélbetét pótlására, illetve cseréjére, akkor az eltávolított rész kialakításánál gondoskodni kell a pótolandó acélbetét olyan elhelyezéséről, hogy a szerkezetre vonatkozó szabályok szerinti betonfedés és a beton tömöríthetősége meglegyen.

19.5.2. A felület kezelése

Ebbe a munkanemcsoportba azok az eljárások tartoznak, amelyeknek elsősorban nem az a céljuk, hogy a betontestből jelentős részeket eltávolítsunk, hanem az, hogy a *felületet alkalmassá tegyük a javító-védő anyag fogadására,* a betonfelületet elláthassák olyan kiegészítő anyagokkal, szerelvényekkel, amelyek a saját erőtani, korrózióvédő funkciójához vagy az azon folyó technológiák funkciójához szükséges.

A *leggyakoribb felületkezelési módszerek:* vágás, fúrás, marás, szemcseszórás, felületkezelés vízsugárral, hősokk stb.

A beszennyezett felületet vegyi felülettisztító módszerekkel meg lehet tisztítani.

19.5.3. A javítás módszerei

A javítás módszerei:

– Polimer betonok (PC), amelyeknek a kötőanyaga műgyanta.
– Polimer-cement-betonok (PCC), amelyeknek a kötőanyaga műanyaggal módosított cement.

A PCC javítóhabarcsokat kényszerkeverőben is legalább 4–5 percen át keverjük. A PCC rendszerek nagy részénél a tapadó híd elő van írva. Ezt egyébként mindig célszerű beiktatni, mert a régi beton felületi stabilitását is növeli. A PCC javítórendszerek vastagsága nincs maximálva. Ügyelni kell azonban arra, hogy a legnagyobb vastagságban is a régi betonnal együtt dolgozzék, zsugorodása ne legyen számottevő.

A minimális rétegvastagság lehetőleg 0,5 cm-nél ne legyen kisebb, ún. nullára kifutó csatlakozásokat célszerű elkerülni.

A PCC rendszerek nedves utókezeléséről általában gondoskodni kell. Vannak azonban olyan gyorskötésű rendszerek is, ahol a szilárdulás normál körülmények között gyorsabb, mint a kiszáradás, s így ezek utógondozást nem igényelnek.

Arról azonban mindig gondoskodni kell, hogy a régi beton felülete a javítás előtt eléggé nedves legyen, hogy a javítóanyagból ne szívja el a nedvességet, hanem a javítóanyag szívhasson az alapfelületből a szilárdulás folyamán.

Készítési eljárások

– Lövellt beton száraz vagy nedves eljárással, esetleg polimerrel nemesített cementtel;
– Cementbeton, amely legalább C25/30 jelű legyen;
– Öntömörödő beton (SCC).

Sok esetben előfordulhat, hogy a javítás vagy a védelem során olyan helyekre kell bejuttatni betont, ahová az csak folyással juthat el, és tömörítésre nincs lehetőség. Ugyanez a helyzet, ha olyan sűrű vasalási csomópontot vagyunk kénytelenek készíteni, ahova szintén nehezen jut el a beton. Természetesen új betontestek legyártásánál is nagy jelentősége van a folyós, öntömörödő betonoknak, ha a gyártandó elem igen vékony, 1–3 cm falvastagságú.

19.6. Megállapítások

A szerkezetek feleljenek meg a szilárdsági, alakváltozási és a tartóssági követelményeknek. A tartóssági követelmény a legszigorúbb, erre példa a niederhaußemi hűtőtorony. Szilárdságtanilag elég lett volna a 35 MPa szilárdsági osztályú beton, a tartósság miatt 85 MPa szilárdsági osztályú betont készítettek.

A tartósság növelésének elsődleges megelőző védelmi eszközei a következők:

– Szabályozás,
– Tervezés,
– Építés (anyagok helyes megválasztása, a tömörség fokozása, például szilikaporral, a fagy- és sózásállóság növelése légpórusképzővel, mindezek összefoglalása a betontechnológiai utasításban).

A megfelelő beton- és építéstechnológiai utasítás, a minőség-ellenőrzés, valamint az üzemeltetés és fenntartás szabályozása, valamint az előírások betartása, mind előfeltétele a műtárgy tartósságának. A tartósság növelésének további fontos eszköze a másodlagos megelőző védelem, amely azt jelenti, hogy már az új szerkezetet is védeni kell a külső hatások ellen. Erre akkor van szükség, ha az elsődleges védelem nem elégséges. Másodlagos megelőző védelmet csak anyagtanilag, szerkezetileg és funkcionálisan is jól ismert beton- és vasbeton műtárgyakon szabad kialakítani.

Nagyon fontos a betonfelület előkészítése és ellenőrzése. A felületvédelmi rendszerek közül a legjobban bevált a polimerdiszperzióval módosított cement.

Végül szempontokat adtunk a meghibásodott beton javítására és védelmére.

20. A légköri szennyeződés hatása a betonra

[*Balázs–Csányi–Tamás* (1997), *Balázs* (2001), *Balázs–Csányi* (2001, 1994), *Balázs–Cziczó–Deméné Csányi* (1990)]

20.1. Bevezetés

Az iparosodás, valamint a gépkocsiforgalom hallatlan mértékű növekedése azt eredményezte, hogy a levegő hagyományos alkotója, a CO_2 koncentrációja egyes helyeken megnőtt, és egyre növekedett azon szennyező anyagok mennyisége is, amelyek mind az egészségre, mind az épített környezetre, így a betonra is károsak lehetnek. Előbbi miatt hazánk kijelölt területein rendszeresen méri a különböző szennyezőanyagok mennyiségét az OKK Országos Környezet-egészségügyi Intézete (régi nevén Országos Közegészségügyi Intézet).

1988-ban szakértői tevékenység során vizsgáltuk a déli összekötő vasúti híd pesti oldalon lévő, merev acélbetétes tartóinak állapotát. A derivatográfiás vizsgálatok a morzsolódó betonfedésben hétszer annyi gipszet mutattak, mint amennyit a cementbe kötésszabályozóként bekevertek.

Ettől kezdve tanulmányoztuk

– A légkört szennyező anyagokat,
– A korróziós károkat és
– Modellkísérlettel vizsgáltuk a légköri szennyeződés hatását.

Megjegyzem, hogy nemzetközi konferenciák foglalkoztak a levegő szennyezettségével és annak hatásával. A BME Építőanyag Tanszék dolgozói ezeken a konferenciákon a légszennyeződés betonra való hatásával foglalkoztak. [*Balázs–Csányi–Kovács* (1990), *Balázs–Kovács–Csányi* (1993), *Balázs–Csányi* (1994)].

20.2. A légszennyeződés mértéke

Részletesen tanulmányoztuk a légkört szennyező anyagok forrásait és hatásukat a betonra. A szén-dioxid (CO_2) nem sorolható a szennyező anyagok közé, hiszen a növényi asszimiláció és így a levegő nélkülözhetetlen alkotója. A beton karbonátosodásával azonban számolni kell [*Balázs–Cziczó–Deméné Csányi* (1990)].

A légköri kénvegyületek közül legnagyobb a kén-dioxid (SO_2) mennyisége, melynek 60–70%-a származik emberi tevékenységből (széntüzelésű erőművek, kohászat, kénsavgyártás, cementgyártás, kőolaj-feldolgozás stb.). A levegőben előfordulnak egyéb kénvegyületek is, de azok könnyen átalakulnak kén-dioxiddá, ill. kénessavvá, majd kénsavvá.

A nitrogénvegyületek közül legfontosabb a nitrogén-dioxid (NO_2) és a nitrogén-monoxid (NO). Szokásos együttes jelölésük: NO_x. A levegőbe kerülő nitrogén-oxidok mintegy 37%-át az emberi tevékenység (tüzelőanyagok égetése, közlekedés, műtrágyaipar stb.) eredményezi. Ezek az oxidok a légkörben salétromos savvá, majd salétromsavvá alakulnak. A légkörben ugyancsak előforduló ammónia (NH_3) bázikus vegyület, mely a természetes forrásokon kívül főként állattenyésztő telepekről és műtrágyagyárakból kerül az atmoszférába.

A légkört szennyező egyéb gáz alakú anyagok (fluor, hidrogén-fluorid, klór, hidrogén-klorid) jelentősége az előbbieknél kisebb.

A szilárd szennyeződések (szálló és ülepedő por) fő alkotói a tüzelésből eredő por és korom, a talajfelszínről és ipari tevékenységből származó por. Ezek összetétele igen változó, és szerepük elsősorban a szabadtéri felületek elszennyezésében, kisebb mértékben pedig a korrozív hatású anyagok közvetítésében jelentős.

A szennyező anyagok a légkörből kétféle módon hullhatnak ki: állandóan végbemenő száraz ülepedés formájában, vagy csapadék keletkezésekor, nedves ülepedés (savas eső) formájában, amely sok esetben 4–5 pH-jú.

Továbbiakban azt tanulmányoztuk, hogy a légköri SO_2 és NO_x hatására a betonban milyen kémiai reakciók mennek végbe.

Scholl és *Knöfel* (1991) a légkör savanyú gázainak épületeket károsító hatását mind az ún. nedves, mind a száraz ülepedés esetén feltételezte. Nedves ülepedés során a vízcseppekben oldott gázmolekulákat az eső, köd és a hó juttatja a felületekre. Ennek főként a fő széliránynak kitett épületrészek esetén van jelentősége. Száraz ülepedéskor vagy a gázmolekulák közvetlen adszorpciója megy végbe a felületeken, vagy a savas és bázikus szennyezőkből a légkörben keletkező, főként ammónium-szulfátból ($(NH_4)_2SO_4$) és ammónium-nitrátból (NH_4NO_3) álló aeroszol cseppecskék kerülnek a felszínre.

Perseke (1982) meteorológiai mérései szerint erősen megterhelt területeken a száraz SO_2-lerakódás van túlsúlyban a nedvessel szemben, és az aeroszol ülepedés is csak jelentéktelen hányadot képez. Ezek az adatok arra utalnak, hogy az építőanyagok károsodásában is a száraz ülepedésnek van nagyobb szerepe. Ez annál is inkább így van, mert a porózus anyagok pórusaiba (amelyek vízzel nem telítettek) a gázállapotú anyag mélyebbre hatol, ugyanakkor nedves ülepedés során a felszíni folyadékfázisban megy végbe gyors átalakulás. Utóbbi járulékos károsító hatásként vehető inkább számításba.

Hensel (1985) a kén-dioxid és a nitrogén-oxidok betonban végbemenő reakcióit a *20.1. táblázatban* összefoglaltak szerint adta meg. Amint a táblázatból kitűnik, a kén- és nitrogén-oxidok vízzel, oxigénnel és a beton alkáli- és alkáliföldfém hidroxidjaival reagálnak. A keletkező reakciótermékek közül a kalcium-szulfát vízben rosszul, a magnézium-szulfát közepesen, a többi só pedig jól oldódik. Az is jellemző még e sókra, hogy vizes közegben semlegesen, illetve gyengén savas kémhatással disszociálnak.

20.1. táblázat. A cementpépben, illetve a cementkőben végbemenő reakciók víz, oxigén, kén-dioxid és nitrogén-oxidok jelenlétében [Hensel (1985)]

Reakció a cementpépben		Reakció a cementkőben		Reakciótermékek
$CaO + H_2O$	$\rightarrow$	$Ca(OH)_2 \xrightarrow{O2}$	$+ SO_2$ $+ NO_x$	$CaSO_4 + H_2O$ $Ca(NO_3)_2 + H_2O$
$MgO + H_2O$	$\rightarrow$	$Mg(OH)_2 \xrightarrow{O2}$	$+ SO_2$ $+ NO_x$	$MgSO_4 + H_2O$ $Mg(NO_3)_2 + H_2O$
$K_2O + H_2O$	$\rightarrow$	$2KOH \xrightarrow{O2}$	$+ SO_2$ $+ NO_x$	$K_2SO_4 + H_2O$ $KNO_3 + H_2O$
$Na_2O + H_2O$	$\rightarrow$	$2NaOH \xrightarrow{O2}$	$+ SO_2$ $+ NO_x$	$Na_2SO_4 + H_2O$ $NaNO_3 + H_2O$

Az eddig ismertetett folyamatokon kívül lejátszódhatnak a következők is:

$$2KNO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(NO_3)_2 + 2KOH$$

$$K_2SO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4 + 2KOH$$

Ha egyidejűen szén-dioxid is jelen van, akkor a cementkő semlegesítődése jelentősen felgyorsul:

$$2KOH + CO_2 \rightarrow K_2CO_3 + H_2O$$

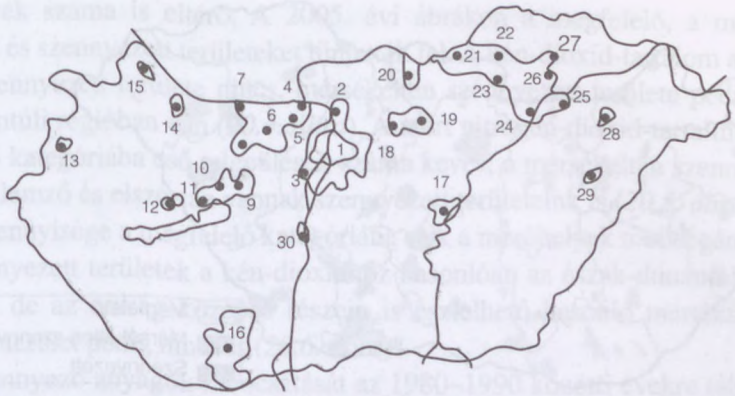
$$K_2CO_3 + Ca(NO_3)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2KNO_3$$

A hazai levegőszennyezettség mértékét és ennek a hatását a legszennyezettebb területeken lévő beton műtárgyakra az Országos Tudományos Kutatási Alap [*Balázs–Csányi* (1994)] és az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság támogatásával kezdtük tanulmányozni.

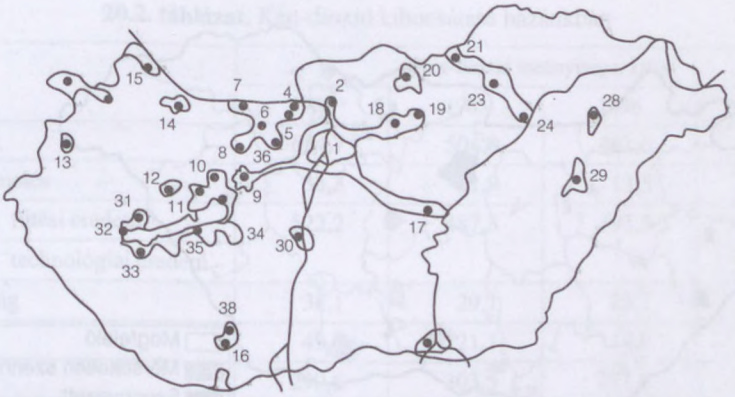
A levegőszennyező anyagok mennyiségét hazánkban 1974 óta rendszeresen mérik. A mért adatokat az Országos Környezetegészségügyi Intézet Levegőhigiéniás Osztályán dolgozzák fel, természetesen az élő szervezetekre vonatkozó határértékek figyelembevételével. Ezek a mérési eredmények azonban a mérnöki szerkezetek anyagainak viselkedése szempontjából is jól hasznosíthatók. A *20.1.–20.3. ábrán* a kén-dioxiddal, nitrogén-dioxiddal és ülepedő porral jelentősen szennyezett területeket mutatjuk be az 1990-es mérési adatok alapján készített légszennyezettségi térképeken.

Az utóbbi másfél évtizedben részben az ipari struktúra átalakulása, részben az egyre szigorodó környezetvédelmi előírások következtében csökkent a szennyező anyagok kibocsátása. Kérésünkre az OKK Országos Környezet-egészségügyi Intézetében feldolgozták a 2005. évi mérési adatokat *(20.4.–20.6. ábra)*.

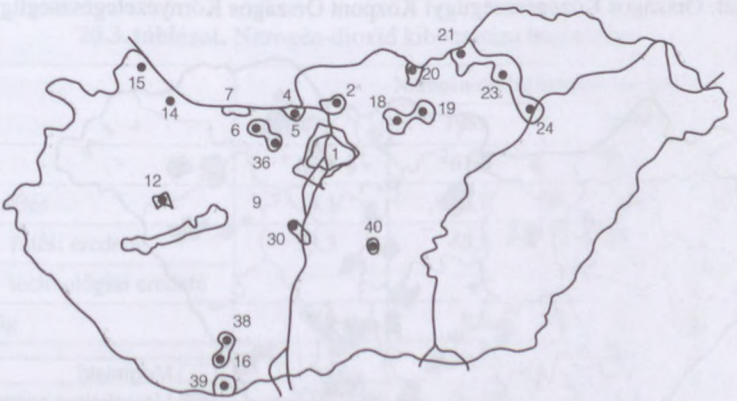
Az 1990. évi és a 2005. évi légszennyeződési térképeket nehéz összehasonlítani, mert más rendszerben készültek, továbbá időközben változtak a kategóriahatárok, és



20.1. ábra. Hazánk kén-dioxiddal jelentősen szennyezett területei 1990-ben az OKI összeállítása alapján [*Balázs–Cziczó–Deméné Csányi* (1990)]



20.2. ábra. Hazánk nitrogén-dioxiddal jelentősen szennyezett területei 1990-ben az OKI összeállítása alapján [*Balázs–Cziczó–Deméné Csányi* (1990)]



20.3. ábra. Hazánk ülepedő porral jelentősen szennyezett területei 1990-ben az OKI összeállítása alapján [*Balázs–Cziczó–Deméné Csányi* (1990)]

20.4. ábra. Települések levegőminősége a határérték túllépése alapján. Kén-dioxid 2004–2005 fűtési félév (Forrás: Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat, készítette *Fodor* József. Országos Közegészségügyi Központ Országos Környezetegészségügyi Intézete)

20.5. ábra. Települések levegőminősége a határérték túllépése alapján. Nitrogén-dioxid 2004–2005 fűtési félév (Forrás: Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat, készítette *Fodor* József. Országos Közegészségügyi Központ Országos Környezetegészségügyi Intézete)

20.6. ábra. Települések levegőminősége a határérték túllépése alapján. Ülepedő por 2004–2005 fűtési félév (Forrás: Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat, készítette *Fodor* József. Országos Közegészségügyi Központ Országos Környezetegészségügyi Intézete)

a mérőhelyek száma is eltérő. A 2005. évi ábrákon a megfelelő, a mérsékelten szennyezett és szennyezett területeket tüntették fel. A kén-dioxid-tartalom alapján hazánknak szennyezett területe nincs, mérsékelten szennyezett területe pedig csak az észak-dunántúli régióban van (*20.4. ábra*). A mért nitrogén-dioxid-tartalmak alapján a megfelelő kategóriába eső települések száma kevés; a mérsékelten szennyezett kategória a jellemző és elszórtan vannak szennyezett területeink is (*20.5. ábra*). Az ülepedő por mennyisége a megfelelő kategóriába esik a mérőhelyek többségén, a mérsékelten szennyezett területek a kén-dioxidhoz hasonlóan az észak-dunántúli régiókra jellemzőek, de az ország középső részein is észlelhető hasonló mértékű terhelés; szennyezett terület pedig nincs is (*20.6. ábra*).

A légszennyező anyagok kibocsátását az 1980–1990 közötti évekre táblázatosan adtuk meg (*20.2.–20.4. táblázat*).

20.2. táblázat. Kén-dioxid kibocsátása hazánkban

Forrás		Kén-dioxid mennyisége, kt/év			
		1980	1985	1986	1990
Hőerőművek		654,7	504,0	461,6	423,0
Egyéb hőtermelés		33,3	21,9	13,5	12,0
Ipar	fűtési eredetű	522,2	487,3	397,5	268,0
	technológiai eredetű				18,0
Mezőgazdaság		38,1	29,1	25,7	22,0
Közlekedés		49,0	21,1	18,6	16,0
Lakosság		290,6	303,5	271,2	222,0
Szolgáltatás		44,9	36,7	29,9	29,0
Összesen:		1632,8	1403,6	1218,0	1010,0

20.3. táblázat. Nitrogén-dioxid kibocsátása hazánkban

Forrás		Nitrogén-dioxid mennyisége, kt/év			
		1980	1985	1986	1990
Hőerőművek		69,0	61,6	51,3	45,0
Egyéb hőtermelés		4,1	3,8	3,6	3,0
Ipar	fűtési eredetű	53,3	48,8	47,6	20,0
	technológiai eredetű				21,0
Mezőgazdaság		9,9	8,6	8,0	7,0
Közlekedés		111,3	110,5	119,6	116,0
Lakosság		18,2	21,5	20,9	19,0
Szolgáltatás		7,1	7,7	7,3	7,0
Összesen:		272,9	262,2	258,3	238,0

20.4. táblázat. Szilárd levegőszennyező anyag kibocsátása hazánkban

Forrás		Szilárd szennyezőanyag mennyisége, kt/év			
		1980	1985	1986	1990
Hőerőművek		220,0	129,0	84,5	33,0
Egyéb hőtermelés		3,2	2,2	1,3	1,0
Ipar	fűtési eredetű	239,1	232,9	20,5	20,0
	technológiai eredetű				51,0
Mezőgazdaság		6,9	8,5	7,1	8,0
Közlekedés		19,4	10,8	11,6	6,0
Lakosság		75,8	94,3	87,0	75,0
Szolgáltatás		12,2	13,9	10,8	11,0
Összesen:		576,6	493,6	407,8	205,0

20.3. Korróziós károk tanulmányozása vasbeton szerkezeteken [*Balázs–Csányi* (2002–2004)]

20.3.1. Észak-magyarországi vasbeton szerkezetek

[*Balázs–Deméné Csányi* (1990)]

A helyszíni vizsgálatokhoz és mintavételhez – a szennyezettségi térképek (*20.1–20.3. ábra*) alapján – 20 évnél idősebb vasbeton szerkezeteket választottunk ki. Arra törekedtünk, hogy sokféle rendeltetésű műtárgy legyen közöttük, így közúti híd, ipari épület, utak menti kerítés, lámpaoszlop stb. [*Balázs–Cziczó–Csányi* (1990)].

Kidolgoztuk a vizsgálat módszerét. A helyszíni szemrevételezés után a vizsgált szerkezet kijelölt helyeinek környezetében – ha arra a műtárgy tulajdonosa vagy kezelője lehetőséget adott – 3-3 darab, 50 mm-es átmérőjű, kb. 150 mm hosszú magmintát fúrtunk. A magmintákat a laboratóriumban szeleteltük: külső részükből 10 mm-es szeleteket vágtunk a kémiai vizsgálatokhoz; a legbelső részből kivágott hengeren szilárdságot mértünk, a középső hengeres részen pedig vízfelvételt, porozitást határoztunk meg.

A vizsgált műtárgyak valamennyi próbavételi helyén ütvefúróval három-három, egymáshoz közeli lyukból 30–50 m mélységig, centiméterenként pormintát vettünk. A három azonos mélységű rétegből származó, egymáshoz közeli lyukból vett por keverékét használtuk a következőkben felsorolt, laboratóriumban elvégzett kémiai vizsgálatokhoz:

- pH-mérés: a porminták 1:2 arányú desztillált vizes szuszpenziójában elektrometriásan;
- kloridion-tartalom: a porminták híg salétromsavas szűrleteiben Mohr-féle argentometriás módszerrel;

– nitrát- és nitrition-tartalom a porminták desztillált vizes szűrleteiben Nitrate-Testtel;
– szulfátion-tartalom: híg sósavas oldás után bárium-kloriddal lecsapva, gravimetriás módszerrel;
– izzítási veszteség (a kötőanyag-tartalom jellemzéséhez): a minták 1000 °C-os tömegveszteségének mérésével;
– sósavban oldható rész (a kötőanyag-tartalom jellemzéséhez): híg sósavval oldható rész mérésével.

A mag- vagy pormintavételi helyek széleinek lepattintásával nyert friss törési felületeken – fenolftalein indikátor 1%-os alkoholos oldatával – megvizsgáltuk a karbonátosodási mélységet is.

A legjobban terhelt városokat a *20.5. táblázat* szemlélteti

20.5. táblázat. A szennyezettebb nagyvárosokat érő terhelések 1990-ben

Szennyeződés helye	Szennyező anyag mennyisége, kt/év		
	Kén-dioxid	Nitrogén-dioxid	Szilárd anyag
Budapest	43,7	20,3	7,4
Győr	7,8	1,4	1,8
Miskolc	34,3	3,2	4,5
Szeged	2,8	1,3	0,6
Tatabánya	108,3	14,1	13,0
Székesfehérvár	4,6	1,2	0,4
Salgótarján	3,0	0,8	0,6
Pécs	58,0	5,1	4,1
Dunaújváros	35,2	3,2	4,7
Kazincbarcika	58,0	4,6	2,6

Az észak-magyarországi műtárgyak helyszíni és laboratóriumi vizsgálatainak eredményeit a *20.6. táblázatban* foglaltuk össze.

A kutatás eredményeinek értékelése

a) A betonokban mért szulfátion-tartalom általában a legkülső, 1 cm-es rétegben volt a legnagyobb, de az is előfordult, hogy az alatta lévő rétegben. Ez azzal magyarázható, hogy a keletkező gipsz egy részét az eső kimossa. A belső rétegek szulfátion tartalma a cementek eredeti gipszkomponenséből adódik, így a külső rétegekben mért értékeket is célszerű erre vonatkoztatni. Eszerint a szulfátfeldúsulás mértéke a 90 éves Váci út (2-es főközlekedési út) menti kerítésben, (kb. 3,3-szoros), továbbá a tokodaltárói 60 éves távvezetéktartó oszlopban és a Sajó-híd betonjában volt a legnagyobb. Utóbbi fiatalabb, de itt a kazincbarcikai iparkörzet szennyező hatása jelentős.

20.6. táblázat. A szennyezettebb nagyvárosokat érő terhelések 1990-ben

Vizsgálat tárgya	Vizsgált réteg mélysége, mm	pH	Szulfátion SO_4^{2-} tartalom, m%		Nitrátion NO_3^- tartalom, m%	Nyomószilárdság MPa	Vízfelvétel, m%	Karbonátosodás mélysége, mm
			betonra	cementre	betonra			
Kerítés, oszlop	0–10	9,96	2,05	14,0	0,05			
Bp. Váci úti kerítés	10–20	10,81	0,71	4,9	0,06	24,0	4,9	20
(kora: 90 év)	20–30	11,85	0,63	4,3	<0,01			
Tokodaltáró	0–10	10,89	0,85	8,2	<0,01			
távvezetéktartó oszlop	10–20	11,54	0,68	3,9	<0,01	10,0	6,5	10–20
(kora: 60 év)	40–50	11,80	0,42	2,7	<0,01			
Dömös távvezetéktartó	0–10	10,50	0,69	3,8	<0,01			
oszlopalap	10–20	10,81	0,35	3,0	<0,01	7,2	7,5	20–30
(kora: 60 év)	40–50	11,00	0,32	3,1	<0,01			
Vasúti hidak	0–10	8,30	0,75	4,3	0,02			
Bp. Illatos út	10–20	8,30	0,24	1,9	<0,01	22,7	2,8	30–40
(kora: 41 év)	20–30	8,30	0,23	1,9	<0,01			
Érdi híd	0–10	11,45	0,31	–	0,04			
(kora: 81 év)	10–20	11,70	0,40	–	<0,01	32,1	2,8	1–3
	20–30	11,86	0,39	–	<0,01			
Közúti hidak	0–10	11,71	0,70	7,5	0,08			
Sajó-híd	10–20	11,65	0,41	4,0	0,07	20,7	5,6	2
(kora: 35 év)	20–30	11,85	0,30	2,2	<0,01			
Tardona patak híd	0–10	11,05	0,73	4,6	<0,01			
(kora: 35 év)	10–20	11,70	0,52	3,6	<0,01	18,9	3,4	8
	20–30	11,80	0,37	3,9	<0,01			
Nyíregyháza,	0–10	9,15	0,64	6,1	<0,01			
Ér patak híd	10–20	9,27	0,17	5,3	<0,01	12,5	5,5	–
(kora: 45 év)	20–30	9,60	0,35	2,7	<0,01			

20.6. táblázat. *folytatás*

Vizsgálat tárgya	Vizsgált réteg mélysége, mm	pH	Szulfátion SO_4^{2-} tartalom, m%		Nitrátion NO_3^- tartalom, m%	Nyomószilárdság MPa	Vízfelvétel, m%	Karbonátosodás mélysége, mm
			betonra	cementre	betonra			
Győri híd (kora: 24 év)	0–10 10–20 20–30	11,00 11,85 11,00	0,79 0,64 0,32	4,5 6,2 3,1	0,05 <0,01 <0,01	24,0	5,5	2–6
Nyíregyháza, (kora: 20 év)	0–10 10–20 20–30	9,80 10,20 11,75	0,38 0,42 0,45	4,5 4,2 3,4	0,02 <0,01 <0,01	20,7	6,4	–
Cementgyárak DCM Lepold-kemence, alap (kora: 30 év)	0–10 10–20 20–30	10,30 11,35 12,00	0,87 0,54 0,31	4,7 3,3 0,31	<0,01 <0,01 <0,01	34,8	3,1	6
Lábatlan, iszapkád melletti támfal (kora: 35 év)	0–10 10–20 20–30	11,40 10,33 11,50	1,65 0,40 0,33	4,7 5,6 2,7	<0,01 <0,01 <0,01	9,8	6,4	10–12
Közút melletti támfal (kora: 35 év)	0–10 10–20 20–30	10,85 10,55 11,50	1,20 0,35 0,33	3,3 4,5 2,7	0,02 <0,01 <0,01	9,4	6,5	8–10
Vegyi üzemek BORSODCHEM Rt. savtartály tartónyereg (kora: 35 év)	0–10 10–20 20–30 50–60	8,90 9,50 9,75 11,20	0,56 0,50 0,36 –	3,6 4,1 2,8 –	4,04 5,69 5,55 –	17,4	6,8	8–10
TVM kénsavgyártó üzem bunker (kora: 42 év)	0–10 10–20 20–30	11,70 12,05 12,06	1,60 0,65 0,60	6,6 2,8 2,7	<0,01 <0,01 <0,01	17,0	5,2	3–5

b) Olyan helyen, ahol levegőt szennyező forrás nincs a közelben (pl. Dömös), még kis szilárdságú, nagy pórustartalmú beton esetén is elhanyagolható volt a szulfátion-beépülés.

c) Igen nagy nitrátion-tartalmat mértünk a Borsodchem Rt. vizsgált műtárgyában, még 3 cm mélységben is. Ennek oka az, hogy a keletkező nitrátvegyületek vízben jól oldódnak, s így az esővízzel bejuthatnak a mélyebb rétegekbe is. A felszíni részből ugyanakkor ki is mosódhat a nitrátok nagy része.

d) Az előbbieknél kisebb, de jól mérhető nitrátion-tartalmakat észleltünk nagy forgalmú utak mentén elhelyezkedő műtárgyakban (Váci úti kerítés, Sajó-híd, Győri híd).

20.3.2. Veszprém környéki hidak vizsgálata

[*Balázs–Csányi* (2002/1)]

A *20.1. és 20.2. ábrán* jól látható, hogy Veszprémnek és környékének a levegője – ipari üzemei miatt – erősen szennyezett. Ezért esett választásunk a Veszprém környéki közúti hidak vizsgálatára [*Balázs–Csányi* (2001)]. A megvizsgált hidakat a környék vázlatos térképén (*20.7. ábra*) megjelöltük.

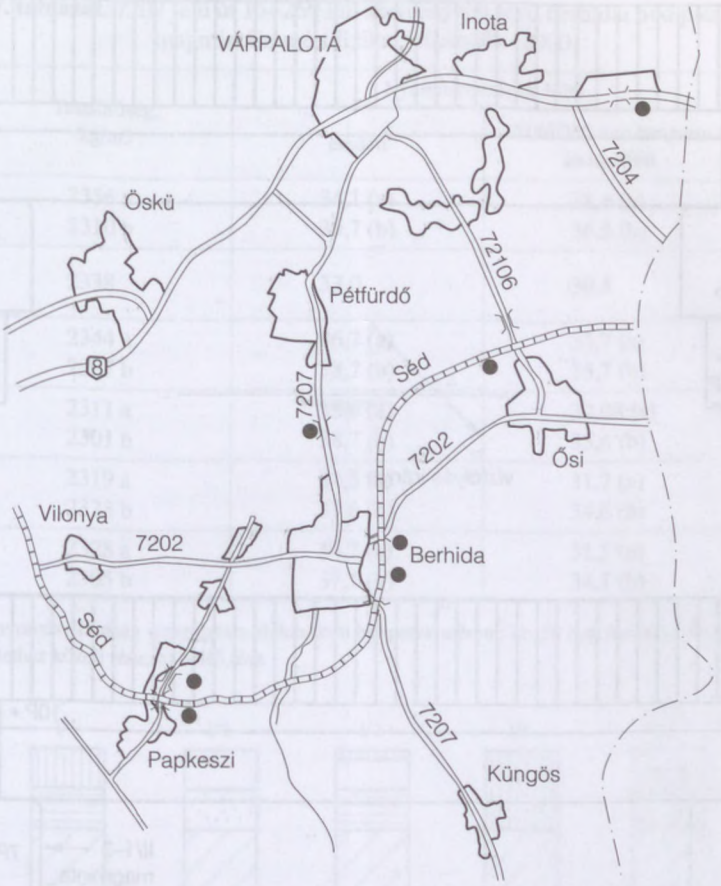
A kutatás során az alábbi hidakat vizsgáltuk meg szennyezettség szempontjából:

– A berhidai Séd patak híd.
– A 7202. jelű Szabadbattyán–veszprémi út 22 + 493 km szelvényében épített Séd-Malomcsatorna híd.
– A 7207. jelű út 19 + 126 km szelvényében lévő Kalóz-patak híd Pétfürdő és Berhida között.
– A 8. jelű út 23 + 283 km szelvényében épített híd (Hidegvölgyi patak).
– A 72106. jelű út 6 + 201 km szelvényében lévő Séd patak híd (Ősi).
– A 7214. sz. út 2 + 153 km szelvényében épített Séd patak híd (Papkeszi).
– A 7215. jelű út 2 + 553 km szelvényében épített Malomárok-híd (Papkeszi).

A továbbiakban részletesen csak a berhidai Séd patak híd vizsgálatát ismertetjük; a többi esetén hasonló eredményre jutottunk.

A 7207. jelű Lepsény–Várpalota út 15 + 269 km szelvényében épített berhidai Séd patak hidat a Közúti Hídszabályzat szerinti „A" terhelési osztályra tervezték, és 1980-ban építették. A híd a patakot merőlegesen keresztezi. A híd 3 nyílású, merőleges szabad nyílása 6,0 + 8,0 + 6,0 m.

A híd felszerkezete háromszor kéttámaszú monolit vasbeton lemez. A vasbeton pályalemezt 37 db FT8A jelű és 2 × 37 db FT6A jelű, szorosan egymás mellé helyezett, előregyártott előfeszített gerendákból készítették. Az előre gyártott tartókat keresztirányú acélbetétekkel és helyszíni B200 jelű betonnal dolgoztatták együtt, és tették monolit vasbeton lemezzé. A hídpályalemezre helyezték a 3 rétegű bitumenes



20.7. ábra. A balatoni iparvidék körzetében megvizsgált hidak.
A hidak helyét az útkm feltüntetésével adtuk meg [*Balázs–Csányi* (2002)]

szigetelést, azt 12–24 cm vastag védőbeton védi. A felszíni vizeket kereszt- és hosszeséssel, valamint a gyalogjáróba épített 4 víznyelővel vezették el.

A hídfők rejtett cölöpös rendszerűek. A cölöpöket 100 cm magas, 85 cm széles fejgerenda fogja össze, és ez támasztja alá a felszerkezetet. A pilléreknél hasonló a helyzet.

A hídfő és a pillér fejgerendája, a felszerkezet helyszíni betonja B200 jelű, min. 270 kg/m^3 350 pc tartalommal.

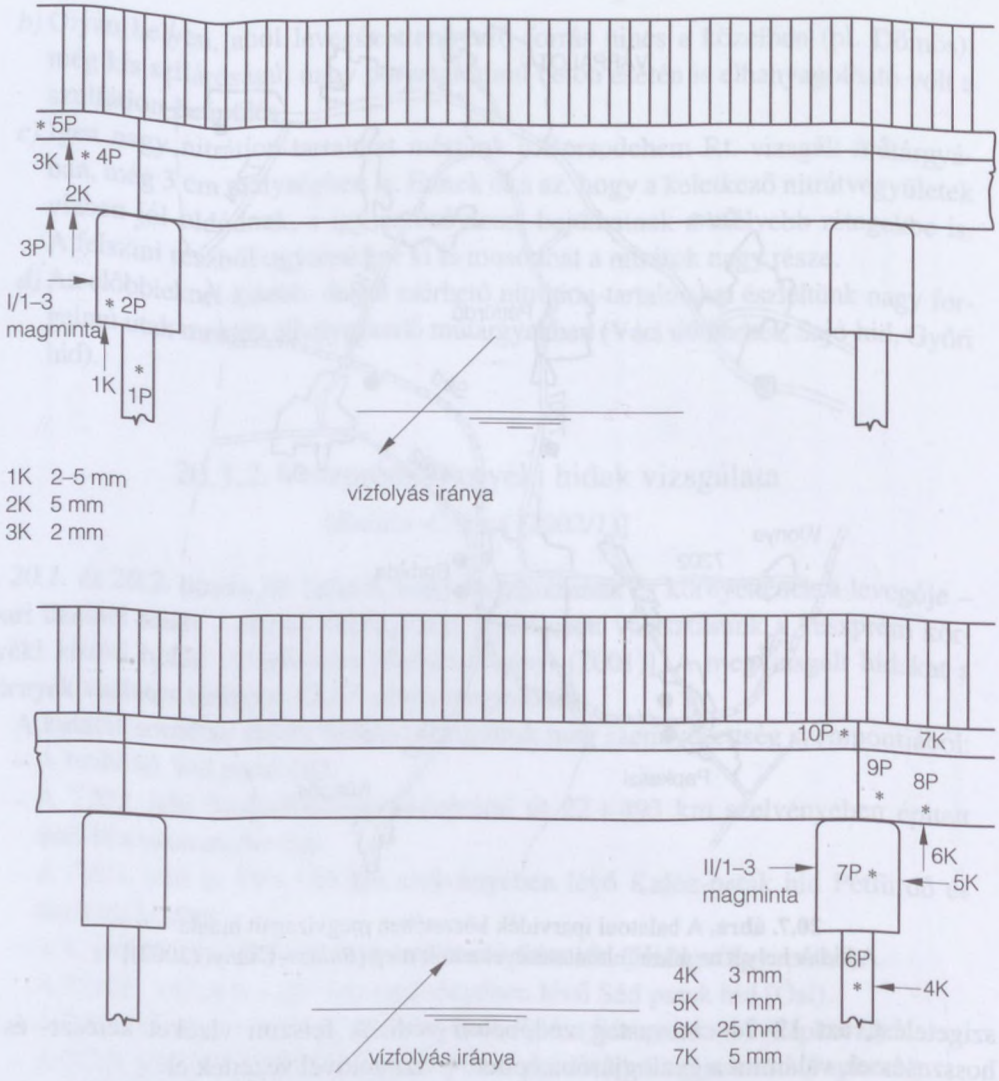
Az előre gyártott cölöpök NCS 80 jelűek, szulfátálló cementtel készültek. A helyszíni betonacél B50 · 36 jelű.

A próbavételi helyeket a *20.8. ábrán* tüntettük fel az alábbi jelölésekkel:

P = pormintavétel kémiai vizsgálatokhoz, ütvefúróval,

K = karbonátosodási mélység meghatározása fenolftaleinnel,

I. és II. jelű hely = magmintavétel, magfúróval.



20.8. ábra. Próbavételi helyek a berhidai Séd patak hídon [*Balázs–Csányi* (2002)]

A helyszínen vett 2 × 3 db magmintát a *20.9. ábra* szerint szeleteltük. A mért fizikai jellemzőket és a szilárdsági adatokat a *20.7. táblázatban* tüntettük fel. A por- és magmintákon mért kémiai jellemzők értékeit a *20.8. táblázatban* foglaltuk össze.

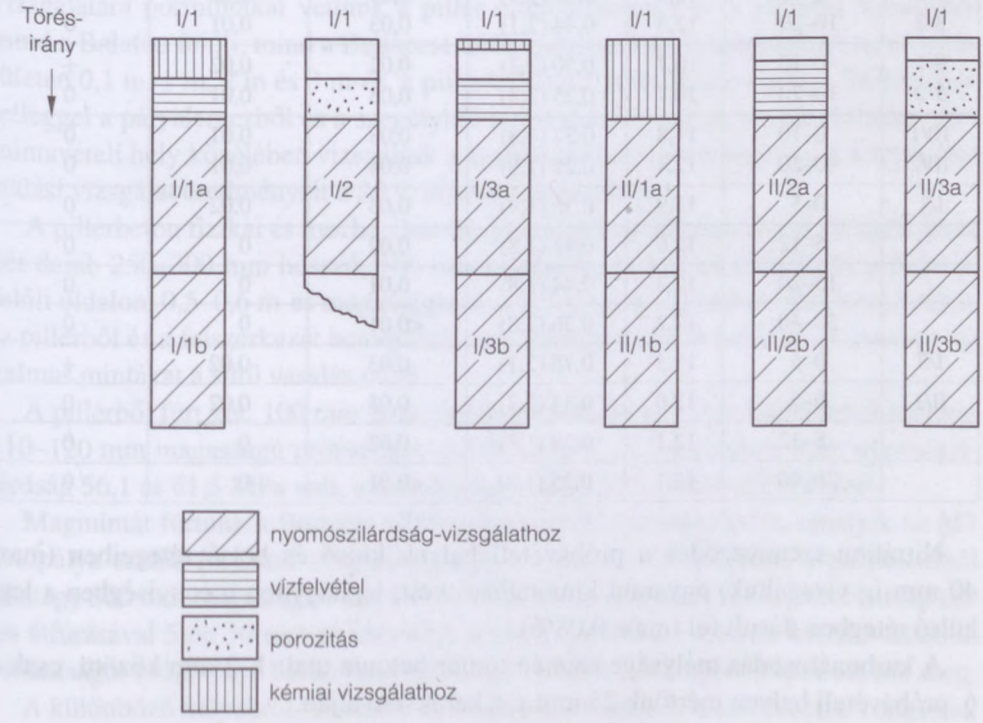
A *20.7. táblázatban* feltüntetett, átszámított szilárdságok szerint a beton (bár a vizsgálat csak tájékoztató jellegűnek tekinthető a kis próbaszám miatt) megfelel a terv szerinti B200 jelű betonnak, a vízfelvétele is tömör betonra utal.

A cementtartalomra számított, tájékoztató jellegű szulfátion-értékek gyakorlatilag megegyeztek a cementtel eleve bevitt mennyiséggel. Egy-két, esőtől védett helyről származó mintában (1/2 és 6/1 jelű) mutatkozott csak közel kétszeres érték a többi mintához képest (*20.8. táblázat*).

20.7. táblázat. 7207 jelű út 15+269 km szelvényben lévő berhidai Séd patak híd magmintáin mért fizikai jellemzők (2000)

Magminta jele	Testsűrűség, kg/m3	Nyomószilárdság, MPa		Vízfelvétel, tömeg%
		eredeti	Ø150/300 mm hengerre átszámított	
I/1	2356 a 2310 b	34,1 (a) 39,7 (b)	31,4 (a) 36,5 (b)	4,8
I/2	2338	33,0	30,4	–
I/3	2344 a 2337 b	36,7 (a) 38,7 (b)	33,7 (a) 35,7 (b)	4,7
II/1	2311 a 2301 b	35,6 (a) 38,7 (b)	32,08 (a) 35,6 (b)	–
II/2	2319 a 2323 b	34,5 (a) 37,6 (b)	31,7 (a) 34,6 (b)	4,6
II/3	2328 a 2305 b	34,2 (a) 37,1 (b)	31,5 (a) 34,1 (b)	–

Megjegyzés: a nyomószilárdság vizsgálatára előkészített hengerek mérete: kb. 50 mm átmérő, 100 mm magasság
Jelölés: a) felülethez közeli rész; b) belső rész



20.9. ábra. Beton magminták darabolási és vizsgálati terve
[*Balázs–Csányi* (2002)]

20.8. táblázat. 7207 jelű út 15+269 km szelvényben lévő berhidai Séd patak-híd betonmintáinak kémiai vizsgálati eredményei (2000)
(A zárójeles értékek a cementre vonatkoznak.)

Minta jele	Vizsgált réteg mélysége mm	pH	Szulfátion	Kloridion	Nitrátion	Nitrition + nyomokban ++ kevés
			tartalom, tömeg%			
1/1	0–10	12,3	0,88 (2,9)	0,04	0,04	0
1/2	10–20	12,3	0,97 (4,7)	0,04	0,02	0
2/1	0–10	12,0	0,45 (2,5)	0,05	0,07	++
2/2	10–20	12,2	0,43 (2,2)	0,05	0,02	0
3/1	0–10	12,3	0,56 (2,2)	0,06	0,04	0
3/2	10–20	12,2	0,54 (2,2)	0,04	0,01	0
4/1	0–10	10,3	0,50 (2,5)	0,04	0,02	0
4/2	10–20	11,9	0,40 (2,2)	0,03	<0,01	0
5/1	0–10	9,9	0,47 (1,9)	0,04	0,02	0
5/2	10–20	11,4	0,28 (2,2)	0,02	0,02	0
6/1	0–10	11,6	0,95 (4,0)	0,04	0,04	+
6/2	10–20	12,2	0,58 (2,8)	0,04	0,01	0
7/1	0–10	11,9	0,52 (1,6)	0,04	0,08	+
7/2	10–20	12,0	0,33 (1,6)	0,05	0,02	0
8/1	0–10	12,3	0,29 (1,3)	0,03	0,02	+
8/2	10–20	12,3	0,44 (2,1)	0,03	0,01	0
9/1	0–10	10,7	0,50 (3,2)	0,02	0,02	+
9/2	10–20	10,7	0,25 (2,3)	0,03	0,01	0
10/1	0–10	11,8	0,37 (1,8)	0,03	0,01	0
10/2	10–20	12,4	0,22 (1,8)	0,04	0,01	0
I/1	0–5	11,9	0,36 (1,9)	0,03	0,02	0
	5–12	12,0	0,41 (1,8)	0,02	0	0
	15–20	12,3	0,44 (1,8)	0,01	0	0
	30–40	12,2	0,36 (2,8)	<0,01	0	0
I/3	0–5	11,5	0,78 (3,1)	0,03	0,02	+
II/1	0–5	12,0	0,34 (2,7)	0,03	0,02	0
	8–12	12,1	0,28 (1,8)	0,02	0	0
	30–40	12,1	0,25 (1,8)	<0,01	0	0

Nitrátion-szennyeződés a próbavételi helyek külső és belső rétegeiben (max. 40 mm-ig vizsgáltuk) egyaránt kimutatható volt; legnagyobb mennyiségben a legkülső rétegben dúsult fel (max. 0,08%).

A karbonátosodás mélysége szintén tömör betonra utal: 1–2 mm közötti, csak a 6. próbavételi helyen mértünk 25 mm-t, a kerékvető alján.

Az acélbetétek korróziójára utaló jelenséget nem észleltünk.

20.3.3. Elbontandó híd vizsgálata

[*Balázs–Csányi–Balázs L.* (2002)]

A Budaörs, Károly király úti felüljáró háromtámaszú vasbeton lemezhíd, amelyet 1963-ban építettek.

A beton jele B280, 350 kg/m^3 C600 jelű cementtel készítve. Betonfedés: 15 mm. A felhasznált betonacélok: Ø14 és Ø25, A50.35.12 (periodikus); Ø40, A50.35.12 (sima); Ø5,5, A36.24.12 (sima) jelű.

Megemlítjük, hogy az 1980-as évek végén a felüljárón észlelt korróziós károk miatt annak felszerkezetére és pillérére átlagosan 30 mm vastag lövelltbetonréteget hordtak fel.

A hidat robbantással bontották 2000. június 3-án éjjel. Az M7-es autópálya csupán 3-án 21.00 órától 4-én 6.00 óráig volt lezárva. Ezalatt az idő alatt elvégezték a felszerkezet és a két pálya közötti pillér robbantását, illetve a törmelékek eltávolítását.

A helyszíni vizsgálatokra és mintavételre a robbantást megelőzően – a forgalom fenntartása mellett – volt lehetőség, így az elsősorban a közbenső pillérre korlátozódott.

A felüljáró alatti rendkívül nagy gépjárműforgalom miatt csak a középső pillér részletes vizsgálatára kerülhetett sor. A gépjárműforgalom okozta levegőszennyező anyagok és a téli jégmentesítő (nátrium-kloridos) sózás hatásának, beépülésének vizsgálatára pormintákat vettünk a pillér oldalfelületéből és a pillérfej betonjából mind a Balaton felőli, mind a Budapest felőli oldalon öt-öt magasságban; az oldalfelületen 0,1 m, 1 m, 2 m és 3 m-es, a pillérfejből 4,5 m-es magasságban. Tájékoztató jelleggel a pályalemezből és a szegélyből is vettünk két-két pormintát. Minden pormintavételi hely közelében vizsgáltuk a karbonátosodási mélységet is. A karbonátosodási vizsgálat eredményeit a *20.9. táblázat* szemlélteti.

A pillérbeton fizikai és mechanikai tulajdonságainak laboratóriumi vizsgálatához két darab 250–300 mm hosszú, 100 mm átmérőjű magmintát fúrtunk ki a Balaton felőli oldalon, 0,5–0,6 m-es magasságban. A helyszínen végzett további magfúrások (a pillérből és a felszerkezet betonjából) nem eredményeztek szilárdsági mérésre alkalmas mintákat a sűrű vasalás miatt.

A pillérből fúrt két, 100 mm átmérőjű magmintából egy-egy acélbetéttől mentes, 110–120 mm magasságú próbatestet alakítottunk ki. A hengereken mért nyomószilárdság 56,1 és 61,5 MPa volt, a testsűrűség pedig 2331, illetve 2351 kg/m^3.

Magmintát fúrtunk a Budaörs felőli rézsűburkoló betonlapból is, amelyik az M7 autópálya szélső forgalmi sávjától csupán 1–2 m-re volt beépítve, a pályaszinttől mintegy 300 mm magasságtól kezdődően. Ezekből a rézsűburkoló lapokból, a lap teljes átfúrásával 5 db 50 mm-es átmérőjű hengert fúrtunk ki, melyek közül 3 darabon szilárdságot (41,0–43,1 MPa) és testsűrűséget (2295–2322 kg/m^3) határoztunk meg.

A különböző helyekről származó betonok tömörségének ellenőrzésére vizsgáltuk azok vízfelvételét (*20.10. táblázat*).

20.9. táblázat. Károly király úti M7 felüljáró (Budaörs) helyszíni karbonátosodási mélység vizsgálatának eredményei (2000)

Vizsgálat száma, helye, magassága			Karbonátosodott réteg vastagsága, mm
1.	Pillér Balaton felől	0,1 m	>30
2.		1 m	>30
3.		2 m	>30
4.		3 m	25
5.	Pillér Budapest felől	0,1 m	3
6.		1 m	7
7.		2 m	10
8.		3 m	5
9.	Lövellt beton alatt Balaton felől	–	8
10.	Lövellt beton alatt Budapest felől	–	8
11.	Pályaszegély széle	–	4
12.	Pályalemez	–	~0

20.10. táblázat. Károly király úti M7 felüljáró (Budaörs) betonmintáinak vízfelvétele (2000)

Minta származási helye, jele	Vízfelvétel, tömeg %	
	24 órás	4 napos
Pillér, 1. jelű magminta	2,78	2,97
Pillér, 2. jelű magminta	2,44	2,86
Kőburkolat mögötti beton szárnyfal	2,74 3,34	2,95 3,36
Rézsűburkoló betonlap		
L1/2 magminta külső része	2,64	2,86
L1/2 magminta belső része	2,57	2,72
L1/3 magminta külső része	2,70	2,91
L1/3 magminta belső része	2,42	2,63

A pillérből vett porminták kémiai vizsgálatának eredményeit a *20.11. táblázat,* a pályabetonból vettekét a *20.12. táblázat* szemlélteti. A táblázatokban megadtuk a cement tömegére vonatkoztatott szennyeződésértéket is.

A kémiai vizsgálatokat a pillérből származó 1-es jelű magminta bevonat alatti részéből, továbbá a magminta belsejéből (kb. 250 mm mélyen) laboratóriumban vett pormintákon is elvégeztük. Az eredmények szerint a pillérbeton bevonat alatti kb. 10 mm-es rétegében még kimutatható volt csekély klorid- és nitrátion-szennyeződés, a mélyebb rétegben viszont már nem.

20.11. táblázat. Károly király úti M7 felüljáró (Budaörs) pilléréből vett beton porminták kémiai vizsgálatának eredményei (2000)
(A zárójelbe tett számok a cement tömegére vonatkoztatott értékek.)

Minta jele	Mintavétel		Szulfátion, SO_4^{2-}	Kloridion, Cl^-	Nitrátion, NO_3^-	Nitrition*, NO_2^-	pH
	helye, magassága	mélysége, mm	tartalom, tömeg%				
1/1	Balaton felőli pillér 0,1 m	0–10	1,69	0,64	0,020	++	10,65
1/2	Balaton felőli pillér 0,1 m	10–20	0,81 (3,9)	0,34 (1,6)	0,008	++	11,60
2/1	Balaton felőli pillér 1 m	0–10	1,34	0,27	0,008	++	10,40
2/2	Balaton felőli pillér 1 m	10–20	0,70 (4,2)	0,15 (0,9)	0,003	++	10,20
3/1	Balaton felőli pillér 2 m	0–10	1,70	0,20	0,017	++	10,08
3/2	Balaton felőli pillér 2 m	10–20	0,45 (1,4)	0,10 (0,3)	0	0	9,90
4/1	Balaton felőli pillér 3 m	0–10	0,67	0,10	0,008	++	11,70
4/2	Balaton felőli pillér 3 m	10–20	0,82 (3,7)	0,05 (0,2)	0,003	++	11,92
5/1	Bp. felőli pillér 0,1 m	0–10	1,63	0,22	0,003	+	11,40
5/2	Bp. felőli pillér 0,1 m	10–20	0,55 (2,2)	0,09 (0,3)	0,002	0	12,40
6/1	Bp. felőli pillér 1 m	0–10	1,33	0,09	0,003	++	11,50
6/2	Bp. felőli pillér 1 m	10–20	0,60 (3,2)	0,05 (0,3)	0	0	12,02
7/1	Bp. felőli pillér 2 m	0–10	1,67	0,12	0,003	++	11,65
7/2	Bp. felőli pillér 2 m	10–20	0,60 (2,3)	0,06 (0,2)	<0,001	+	11,95
8/1	Bp. felőli pillér 3 m	0–10	0,94	0,09	<0,001	0	11,35
8/2	Bp. felőli pillér 3 m	10–20	0,81 (3,6)	0,04 (0,2)	0	0	11,70
9/1	Balaton felőli pillér ~ 4 m	0–10	1,65	0,04	0,008	++	11,35
9/2	Balaton felőli pillér ~ 4 m	10–20	0,31 (1,8)	0,04 (0,2)	0	0	11,70
10/1	Bp. felőli pillér ~ 4 m	0–10	0,91	0,01	0	0	12,05
10/2	Bp. felőli pillér ~ 4 m	10–20	–	0,01	0	0	11,95

* + nyomokban, ++ kevés

Tájékozódásul megvizsgáltuk a mészkő burkolókő alatti szárnyfal betonját is. Ebbe a szerkezeti betonba kloridion már nem tudott bejutni, de a légszennyező anyagok bediffundálhattak, amit a felületi rétegben kimutatott kis szulfátnövekmény és a mérhető nitrátion-tartalom is jelzett.

A helyszíni és laboratóriumi vizsgálatok értékelése

a) A pillér és rézsűburkoló lapok szilárdsága, vízfelvétele

A vizsgált betonok minősítéséhez nem állt rendelkezésünkre elegendő (számú, illetve méretű) próbatest, az eredmények alapján azonban annyi megállapítható, hogy a pillérbeton mind a testsűrűségét, mind szilárdságát tekintve jó minőségű betonnak felelt meg. A rézsűburkoló lapok betonjának szilárdsága természetesen valamivel kisebb volt.

20.12. táblázat. Károly király úti M7 felüljáró (Budaörs) pályabetonjából vett porminták kémiai vizsgálatának eredményei (2000)
(A zárójelbe tett számok a cement tömegére vonatkoztatott értékek.)

Minta jele	Mintavétel		Szulfátion	Kloridion	Nitrátion	Nitrition	pH
	helye	mélysége, mm	tartalom, tömeg%				
11/1	Pályaszegély széle	0–10	0,51 (3,0)	0,09 (0,05)	0	0	11,75
11/2	Pályaszegély széle	10–20	0,47 (2,6)	0,07 (0,04)	0	0	11,63
12/1	Pályalemez	0–10	0,32 (1,5)	0,03 (0,2)	0	0	11,67
12/2	Pályalemez	10–20	0,25 (1,1)	0,02 (0,1)	0	0	11,77

A 24 órás és 4 napos vizsgálati eredmények alapján minden megvizsgált betonminta vízfelvétele kicsi volt, ami jó tömörségre utal.

A rézsűburkoló betonlapok törési felületén, a levegővel érintkező oldalon, 30–40 mm-es vastagságú, világos színű réteget figyeltünk meg mindkét minta esetén. Ezek a részek egyúttal a nagyobb vízfelvételűek is voltak, ami a szennyező anyagok károsító hatásával függhet össze.

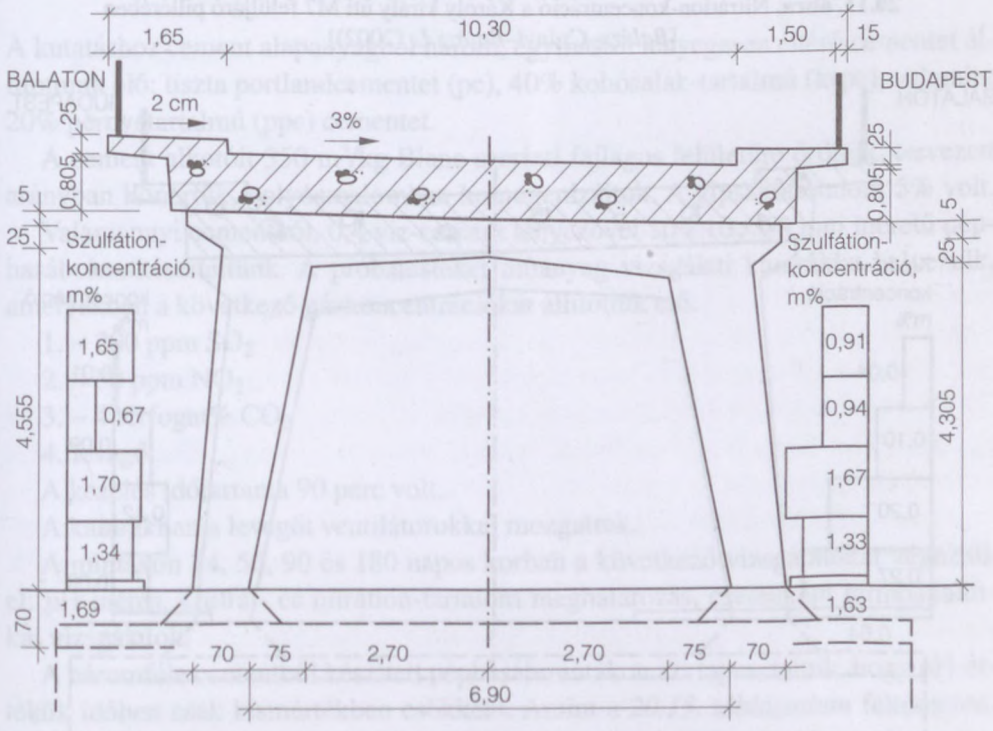
Következtetések a pillérből fúrt magminták alapján:

- A lövellt beton javítóréteg egyes helyeken jól odatapadt a korábbi betonhoz, míg más helyeken elvált.
- A pillér fővasalását alkotó sima acélbetét felülete enyhén rozsdás volt. A rozsdafoltok lenyomata a betét eltávolítása után az őt körülvevő beton felületén is jól látható volt.
- A pillérre az 1980-as évek végén felhordott, 25–30 mm vastag lövellt beton a környezeti hatások következtében jelentősen szennyeződött, mind a jégmentesítő sózásból származó kloridionokkal, mind a levegőből és a gépjárművek füstgázaiból származó szulfát-, nitrát- és nitritionokkal.
- A javítóréteg szennyeződése az útpálya síkjától felfelé és a réteg belseje felé csökkent.

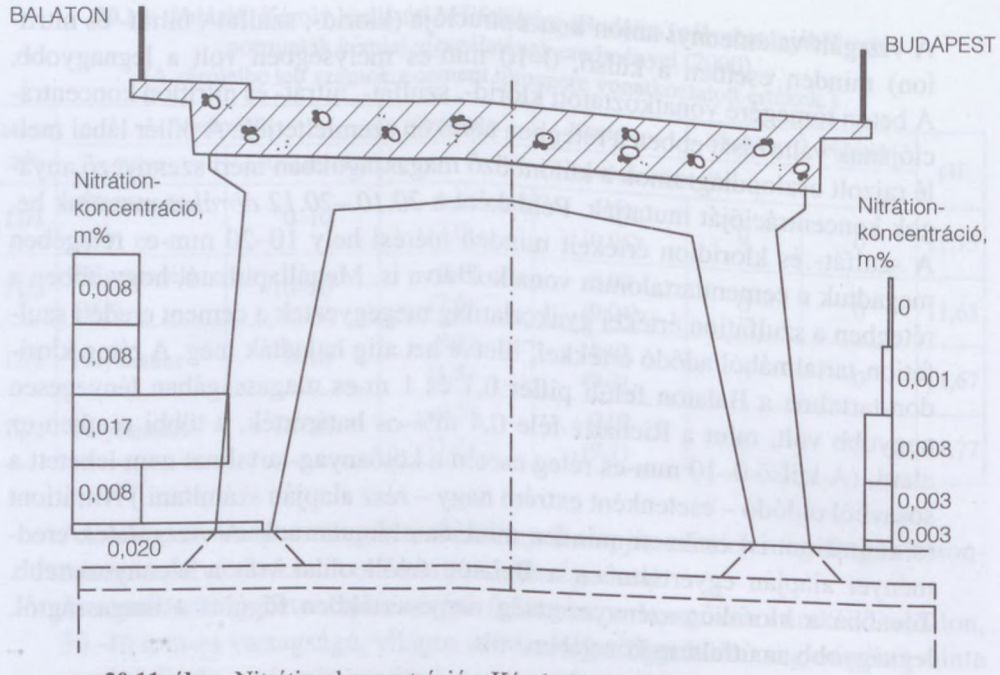
b) A pillér szennyeződései

A porminták pH-értékeit összevetve a *20.9. táblázatban* megadott karbonátosodási mélységekkel, eltérés tapasztalható a Balaton felőli pillér mintái esetén: a mért pH-értékek még a külső, 10 mm-es mélységben is nagyobbak voltak, mint ahogyan azt a nagy karbonátosodási mélység (25–30 mm) alapján vártuk volna. Az ellentmondás abból adódhatott, hogy a karbonátosodási mélységet a pillér környezeti hatásoknak jobban kitett élein mértük, a pormintákat viszont az élektől kb. 300–400 mm-rel beljebb eső felületből vettük.

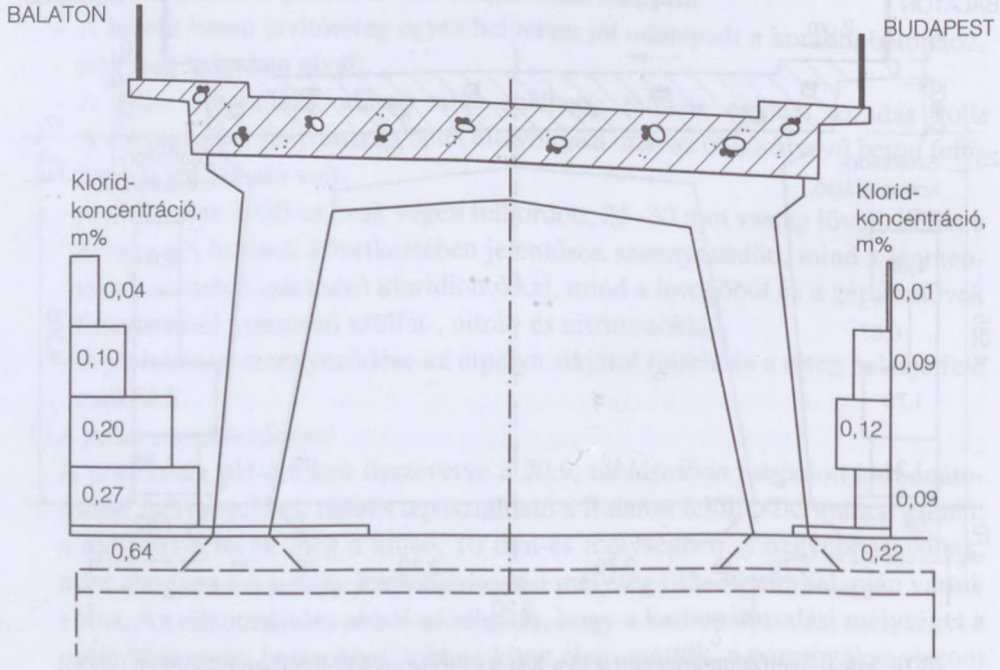
A vizsgált valamennyi anion koncentrációja (klorid-, szulfát-, nitrát- és nitrition) minden esetben a külső, 0–10 mm-es mélységben volt a legnagyobb. A beton tömegére vonatkoztatott klorid-, szulfát-, nitrát- és nitrition koncentrációjának változását ebben a rétegben ábrákon szemléltetjük. A pillér lábai mellé rajzolt oszlopdiagramok a különböző magasságokban mért szennyező anyagok koncentrációját mutatják. Példaként a *20.10.–20.12 ábrákat* mutatjuk be. A szulfát- és kloridion értékeit minden mérési hely 10–20 mm-es rétegében megadtuk a cementtartalomra vonatkoztatva is. Megállapítható, hogy ebben a rétegben a szulfátion értékei gyakorlatilag megegyeztek a cement eredeti szulfátion-tartalmából adódó értékkel, illetve azt alig haladták meg. A réteg kloridon-tartalma a Balaton felőli pillér 0,1 és 1 m-es magasságában lényegesen nagyobb volt, mint a Richartz-féle 0,4 m%-os határérték, a többi esetben ez alatti. (A külső 0–10 mm-es réteg esetén a kötőanyag-tartalmat nem lehetett a sósavból oldódó – esetenként extrém nagy – rész alapján számítani.) Nitrátiont (sőt nitritiont is) csaknem minden mintában kimutattunk. A vizsgálatok eredményei alapján egyértelműen a Balaton felőli oldal volt a szennyezettebb. Továbbá a kloridion-szennyezettség nagymértékben függött a magasságtól, legnagyobb az útfelszín közelében volt.



20.10. ábra. Szulfátion-koncentráció a Károly király úti M7 felüljáró pillérében (2000) [*Balázs–Csányi–Balázs L.* (2002)]



20.11. ábra. Nitrátion-koncentráció a Károly király úti M7 felüljáró pillérében [*Balázs–Csányi–Balázs L.* (2002)]



20.12. ábra. Kloridion-koncentráció a Károly király úti M7 felüljáró pillérében (2000), [*Balázs–Csányi–Balázs L.* (2002)]

A javítóréteg alatti beton külső rétegében már csak kis mennyiségű klorid- és nitrátion jelenlétét észleltük. Ugyanitt – a beton jó állapotára utaló – 12-es pH-t mértünk.

c) A pályabeton szennyeződései (20.12. táblázat)

A pályabeton pormintáiban szennyeződésként kloridiont mutattunk ki. Ennek mennyisége a lemezben kisebb volt (a cementre vonatkoztatva 0,1–0,2%), a kerékvetőben – a jégmentesítő sólé lecsorgása miatt – nagyobb (0,4–0,5%). Szulfátion-feldúsulás nem volt kimutatható, sőt a szegélyben inkább kismértékű kioldódást érzékeltünk. A mért pH-értékek (11,6–11,8) egyébként jó állapotú betonra utaltak.

20.4. A légköri szennyeződéssel kapcsolatos modellkísérletek

20.4.1. Pépkísérletek

[*Balázs–Csányi* (2001), *Balázs–Csányi–Tamás* (1997)]

A kutatáshoz cement alapanyagból három, egymástól lényegesen eltérő cementet állítottunk elő: tiszta portlandcementet (pc), 40% kohósalak-tartalmú (kspc), valamint 20% pernyetartalmú (ppc) cementet.

A cement alkotóit 350 m^2/kg Blane szerinti fajlagos felületűre őröltük, tervezett arányban kimértük, golyósmalomban homogenizáltuk. A gipszkőtartalom 5% volt.

Valamennyi cementből, 0,4 víz-cement tényezővel $10 \times 10 \times 50$ mm méretű péphasábokat készítettünk. A próbatesteket műanyag vizsgálati kamrákba helyeztük, amelyekben a következő gázkoncentrációkat állítottuk elő:

1. ~ 200 ppm SO_2
2. ~ 80 ppm NO_2
3. ~ 4 térfogat% CO_2
4. levegő

A kezelés időtartama 90 perc volt.

A kamrákban a levegőt ventilátorokkal mozgattuk.

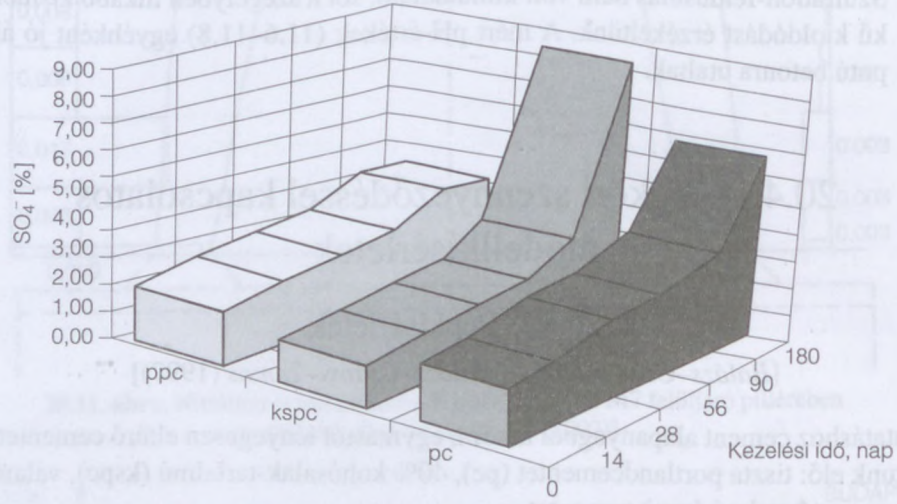
A mintákon 14, 56, 90 és 180 napos korban a következő vizsgálatokat végeztük el: pH-mérés, szulfát- és nitrátion-tartalom meghatározás, esetenként termoanalitikai vizsgálatok.

A háromféle cementből készített péphasábmintákon azt tapasztaltuk, hogy pH-értékük időben csak kismértékben csökkent. Amint a *20.13. táblázatban* feltüntetett, 90 napos korú értékek mutatják, a CO_2 térhatása volt a legjelentősebb.

A pépek szulfát-szennyezettségének változását a rétegmélység, a cementfajta és a kezelési idő függvényében a *20.13. ábrán* mutatjuk be. A pépekben a szulfátion

20.13. táblázat. Különböző terekben, 90 napig tárolt cementpépek pH értékei

Cement jele	Kiindulási értékek	Tárolótér			
		levegő	CO_2	SO_2	NO_2
pc	13,05	12,71	12,48	12,65	12,55
kspc	13,00	12,59	12,00	12,52	12,46
ppc	13,06	12,70	12,39	12,56	12,57



20.13. ábra. Kén-dioxid tartalmú térben tárolt cementpépek szulfátion-tartalma a kezelési idő függvényében [*Balázs–Csányi* (2001)]

mennyisége kezdetben – a cement minőségétől függetlenül – kismértékben nőtt, majd a növekedés 90 és 180 napos kor között jelentősebbé vált. A kísérlet végére a pernyetartalmú minták szulfátion-tartalma 2,5-szerese, a portlandcementeké kb. 3-szorosa, a kohósalakot tartalmazó mintáké pedig 6-szorosa volt az eredeti értékének. 90 napos kor után a portlandcementből és a kohósalakot is tartalmazó cementből készített hasábok felületén sárgásfehér sókivirágzás jelent meg, mely utóbbiakról 180 napos korra rétegesen levált. A levált rétegről termoanalitikai módszerrel kimutattuk, hogy kb. 80%-a gipsz volt.

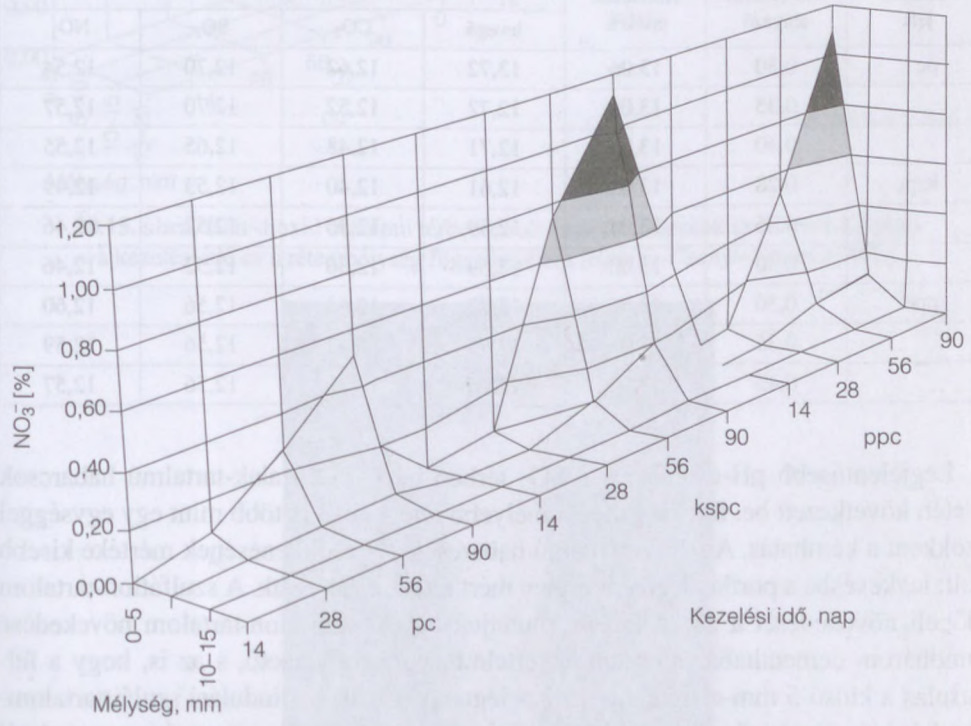
Annak megállapítására, hogy a felületi sókivirágzás, illetve leváló réteg fő tömegét képező gipsz a cement melyik fázisából keletkezett, valamennyi SO_2-dal kezelt pépen végeztünk termoanalitikai vizsgálatokat. Ezek alapján a minták kalcium-hidroxid és kalcium-karbonát fázisának változására 90 napos korban a *20.14. táblázatban* összefoglalt értékeket kaptuk.

Vizsgálataink szerint a kohósalakot tartalmazó minták kalcium-hidroxid fázisának a csökkenése 2,5–4-szerese volt a másik két cementének, a kalcium-karbonát fázis pedig gyakorlatilag egyenletesen fogyott a mintákban.

20.14. táblázat. Kén-dioxiddal kezelt pépminták termoanalitikai vizsgálatának eredményei

Minta jele	Kezelés időtartama, perc	Kalcium-hidroxid vízvesztése, % (változás, %)		Kalcium-karbonát szén-dioxid-vesztése, % (változás, %)	
pc	0	3,82		9,08	
	90	3,50	(–8)	4,95	(–45)
kspc	0	2,69		6,73	
	90	1,79	(–34)	2,39	(–44)
ppc	0	13		8,87	
	90	2,97	(–8)	4,36	(–49)

A péphasábok nitrátion-tartalmának növekedését szemlélteti a *20.14 ábra.* Megfigyelhető, hogy már 14 napos korban is mérhető mennyiségű volt a minták nitrátion-tartalma, a kísérlet végére pedig 1,1–1,4% közötti volt a beépülés, s alig függött a cement minőségétől.



20.14. ábra. Nitrogén-dioxid tartalmú térben tárolt cementpépek nitrátion-tartalma a kezelési idő és a rétegmélység függvényében [*Balázs–Csányi* (2001)]

20.4.2. Habarcskísérletek

[*Balázs–Csányi–Tamás* (1997)]

Készítettünk 0/1 mm-es kvarchomokkal, 0,5-os víz-cement tényezővel habarcshasábokat is. A hasábokat 24 órás korban a sablonból kivettük és kb. 20 °C hőmérsékletű, 100% relatív légnedvességű térben tároltuk 28 napos korukig. Ezután a habarcshasábok négy oldallapját 0,5–1,0 mm vastagságú, epoxigyanta-alapú festékréteggel vontuk be, majd a *20.4.1. fejezetben* ismertetett gázok hatásának tettük ki.

Az oldallapjukon festékréteggel bevont cementhabarcshasábok a vizsgálati gázok behatolási mélységének tanulmányozására is alkalmasak voltak.

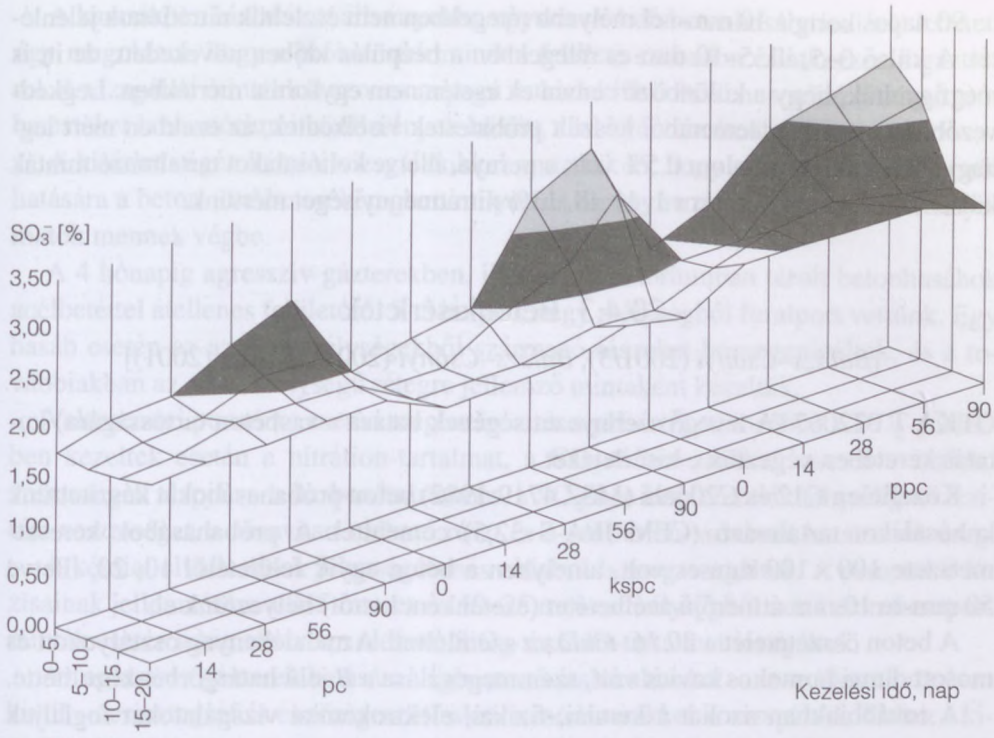
A hasábok rétegein 90 napos korban mért pH-értékeket a *20.15. táblázatban* foglaltuk össze.

20.15. táblázat. Különféle cementekkel készített habarcshasábok pH-értékei (90 napos összehasonlító adatok)

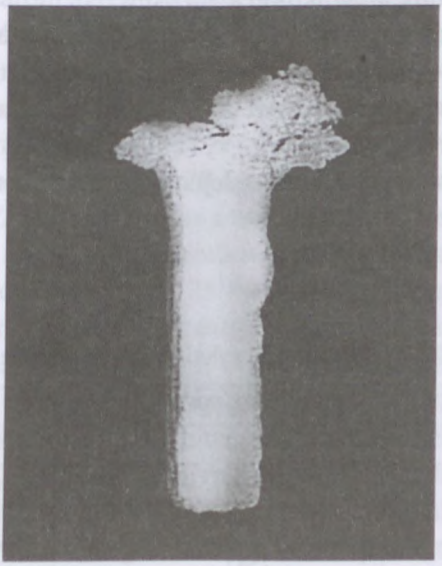
Cement jele	Víz-cement tényező	Kiindulási értékek	Tárolótér			
			levegő	CO_2	SO_2	NO_2
pc	0,30	13,06	13,72	12,62	12,70	12,54
	0,35	13,06	12,72	12,52	12,70	12,57
	0,40	13,05	12,71	12,48	12,65	12,55
kspc	0,28	13,03	12,61	12,40	12,53	12,49
	0,35	13,04	12,59	12,30	12,52	12,46
	0,40	13,00	12,59	12,30	12,52	12,46
ppc	0,30	13,05	12,72	12,64	12,56	12,60
	0,35	13,06	12,70	12,42	12,56	12,59
	0,40	13,06	12,70	12,39	12,56	12,57

Legjelentősebb pH-csökkenés a SO_2 térben tárolt kohósalak-tartalmú habarcsok esetén következett be. Ezeknél még a mélyebb rétegekben is több mint egy egységgel csökkent a kémhatás. A pernyetartalmú habarcsok pH-csökkenésének mértéke kisebb volt; legkevésbé a portlandcement esetén mért értékek változtak. A szulfátion-tartalom időbeli növekedését a *20.15. ábrán* mutatjuk be. A szulfátion-tartalom növekedése mindhárom cementhabarcs esetén egyértelműen megfigyelhető, s az is, hogy a feldúsulás a külső 5 mm-es rétegben volt a legnagyobb. Itt a kiindulási szulfáttartalomhoz képest a portlandcementből készült mintáknál 1,5-szeres, a pernyés cementeknél 1,6-szoros, a kohósalakot tartalmazóknál pedig 2-szeres volt a növekedés.

A *20.16. ábrán* olyan cementhabarcsról készült felvételt mutatunk be, amely egyik végét több órán keresztül a SO_2 gázáramlás hatásának tettük ki. A megnövekedett térfogatú, kemény képződményről termoanalitikai vizsgálatokkal megállapítottuk, hogy annak 84%-a gipsz volt.



20.15. ábra. Kén-dioxid tartalmú térben tárolt cementhabarcsok szulfátion-tartalma a kezelési idő és a rétegmélység függvényében [*Balázs–Csányi–Tamás* (1997)]



20.16. ábra. SO_2-gázáramlásnak közvetlenül kitett cementhabarcs próbatest (A hasáb hosszanti lapjait festékbevonat védte) [*Balázs–Csányi–Tamás* (1997)]

90 napos korig a 10 mm-nél mélyebb rétegekben nem észleltük nitrátionok jelenlétét. A külső 0–5, ill. 5–10 mm-es rétegekben a beépülés időben növekedett, de itt is megfigyeltük, hogy a különböző cementek esetén nem egyforma mértékben. Legkedvezőbben a portlandcementből készült próbatestek viselkedtek, az ezekben mért legnagyobb nitrátion-tartalom 0,5% volt, a pernye, illetve kohósalakot tartalmazó minták külső rétegében ugyanakkor 1, 11, ill. 13% nitrátmennyiséget mértünk.

20.4.3. Betonkísérletek

[*Balázs–Csányi* (2001/3), *Balázs–Csányi* (2001), *Balázs* (2001)]

OTKA T 022067 (A levegő szennyezettségének hatása a vasbeton tartósságára) kutatás keretében végeztük e kísérleteket.

Közelítően C12 és C20 jelű (MSZ 4719:1982) beton próbahasábokat készítettünk kohósalakot tartalmazó (CEM II/A-S 32,5) cementtel. A próbahasábok keresztmetszete 100 × 100 mm-es volt, amelyben a beton egyik felületétől 10, 20, illetve 50 mm-re 10 mm átmérőjű acélbetétet (esetenként kettőt) helyeztünk el.

A beton összetételét a *20.16. táblázat* szemlélteti. Az adalékanyag osztályozott és mosott dunai homokos kavics volt, szemmegoszlása a *B* jelű határgörbét közelítette.

A továbbiakban azokat a kémiai, fizikai, elektrokémiai vizsgálatokat foglaljuk össze, amelyekkel az acélbetét korróziós veszélyeztetettségét próbáltuk megítélni.

Az agresszív gáztereket 200 literes műanyag kamrákban állítottuk elő, melyekbe – a megfelelő gázpalackokból (CO_2, SO_2 és NO_2) – műanyag csöveken, rotaméter közbeiktatásával adagoltuk időszakosan a gázokat.

A kamrák gáztartalmának egyenletességét a fedőlapra szerelt ventilátorokkal segítettük elő. A gázkoncentrációkat naponta kétszer ellenőriztük: a SO_2- és NO_2-tartalmat IMR 2500 típusú gázelemzővel, a CO_2-tartalmat manométeres gázmérővel mértük.

A gázterek koncentrációja a kísérlet idején a következő értékek között változott:

CO_2-tér:	4–8 térfogat%
SO_2-tér:	200–500 ppm
NO_2-tér:	50–150 ppm

20.16. táblázat. A kísérleti betonok összetétele

Összetevők/jellemzők	C12–16/KK	C20–16/KK
Cement, kg/m³	240	370
Víz, kg/m³	160	190
Adalékanyag, kg/m³	1947	1784
Összesen, kg/m³	2347	2344
Finomsági modulus	5,6	5,6

A kamrákban kialakított állványokon egyszerre 4 db betonhasáb tárolását lehetett úgy megoldani, hogy a próbatestek minden felülete szabadon érintkezzen a gáztérrel. A vizsgálati mintákkal azonos anyagú és kialakítású összehasonlító (etalon) próbatesteket laboratóriumi körülmények között, szabadon tároltuk.

A kísérlet végén kémiai vizsgálatokkal mutattuk ki, hogy a levegő fő szennyezői hatására a beton-, vasbeton kéregben milyen és mennyire mélyre ható kémiai folyamatok mennek végbe.

A 4 hónapig agresszív gázterekben, illetve laboratóriumban tárolt betonhasábok acélbetéttel átellenes felületéről 5–5 helyen, négy mélységből furatport vettünk. Egy hasáb esetén az azonos mélységekből származó részeket homogenizáltuk, és a továbbiakban az adott mélységű rétegre jellemző mintaként kezeltük.

Valamennyi porminta esetén meghatároztuk a pH-értéket, továbbá a NO_2-gáztérben kezeltek esetén a nitrátion-tartalmat, a CO_2-térben tároltak esetén – izzítási veszteségek alapján – a karbonáttartalmat, a SO_2-ben tárolt mintáknál pedig az izzítási veszteséget, a sósavban oldható részt és a szulfátion-tartalmat határoztuk meg.

A kémiai elváltozások jelenségét más oldalról is megvizsgáltuk. A cementkő fázisainak jellemzésére a 0–5 mm-es és 10–25 mm-es mélységből vett beton furatporminták esetén a híg sósavban oldható SiO_2- és CaO-tartalmat vizsgáltuk.

Az agresszív gázterek hatására végbemenő átalakulásokat – az oxidos elemzésen kívül – derivatográfiás és röntgendiffrakciós módszerekkel is vizsgáltuk. Ehhez a kísérlet végén vett porminták közül a 0–5 és a 10–25 mm-es mélységből származókat használtuk fel.

A kémiai vizsgálatokból levont következtetések:

A betonhasábok a három agresszív gáztérben a várakozásnak megfelelően viselkedtek: mindig a kisebb szilárdságú (C12) beton esetén mértünk nagyobb mértékű szennyeződést.

Legjelentősebb változást az SO_2-térbe helyezett próbatestek mutattak (*20.17. táblázat*), ahol a kisebb szilárdságú (C12) betonok felső, 5 mm-es rétegében a belső (25–40 mm-es) részekhez viszonyítva 10-szeres szulfátion-tartalmat mértünk, míg a nagyobb szilárdságú (C20) betonoknál ez a viszony kb. 4-szeres volt. A SO_2-behatolás és a szulfátion-tartalom növekedése – mindkét esetben – még a 10–25 mm-es rétegben is jól mérhető volt: közel 1,5-szeres. A 25–40 mm-es mélységből származó furatporminták szulfátion-tartalma gyakorlatilag megfelelt a cement gipszkőtartalmának.

A NO_2-os kezelés hatása hasonló volt (*20.18. táblázat*), itt is a legfelső rétegekben mért koncentráció volt a legnagyobb: 2,5 tömeg% nitrátiont tartalmazott a C12 jelű beton, a C20 jelű beton pedig 1,5 tömeg%-ot. A két érték aránya kb. 1,7, míg a szulfátionok esetén 2,8, ugyanazon rétegmélységet figyelembe véve.

A nagyobb szilárdságú beton mélyebb rétegeiben már csak igen kis nitrátion-tartalmakat mértünk (0,1–0,01 tömeg%), tehát a kisebb porozitás jelentősen fékezte a NO_2 diffúzióját. A kisebb szilárdságú betonban mért nitráttartalom csökkenése a ré-

tegmélységgel az előbbinél kisebb mértékű volt, de a 25–40 mm-ről származó porminta nitrátion-tartalma máris 0,01 tömeg% volt.

20.17. táblázat. Négy hónapig SO_2-térben tárolt betonhasábok pormintáinak kémiai vizsgálati eredményei

Beton jele MSZ 4719:1982 szerint	Vizsgált réteg mélysége, mm	pH	Sósavban oldható rész	Izzítási veszteség	Szulfátion-tartalom	
					betonra vonatkozó	cementre vonatkozó
			tömeg%			
C12	0–5	9,19	19,53	5,14	5,17	35,9
	5–10	11,42	17,63	5,09	1,21	9,6
	10–25	12,32	16,30	4,77	0,55	4,8
	25–40	12,40	16,53	4,55	0,41	3,4
C20	0–5	10,52	25,80	6,47	2,45	12,7
	5–10	12,33	18,98	5,12	0,92	6,6
	10–25	12,41	20,31	4,67	0,72	4,6
	25–40	12,41	23,08	5,54	0,58	3,3

20.18. táblázat. Négy hónapig NO_2-térben tárolt betonhasábok pormintáinak kémiai vizsgálati eredményei

Beton jele MSZ 4719:1982 szerint	Vizsgált réteg mélysége, mm	pH	Nitrátion-tartalom, tömeg%
C12	0–5	10,05	2,5
	5–10	12,10	0,4
	10–25	12,47	0,15
	25–40	12,47	0,01
C20	0–5	11,20	1,5
	5–10	12,30	0,1
	10–25	12,48	0,07
	25–40	12,48	0,01

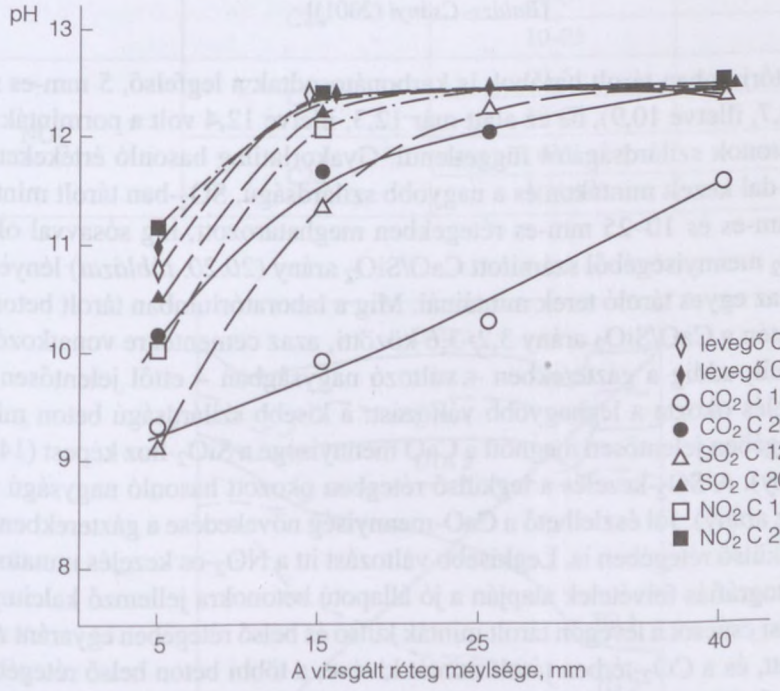
A CO_2-kezelés hatására bekövetkezett karbonátosodás (*20.19. táblázat*), amit a mintákról felvett derivatogramokon az 500 és 900 °C közötti tömegveszteség mértékével jellemeztünk, csak kismértékű eltérést mutatott a kétféle beton esetén. A felső 5 mm-es rétegre vonatkozó érték 1,5, illetve 1,6 szorosa volt a 25–40 mm-es rétegének. A csekély különbséghez természetesen hozzájárult az is, hogy a nagyobb szilárdságú beton nagyobb cementtartalmából eleve több kalcium-hidroxid, s ennélfogva több karbonát is keletkezett.

Amint a különböző mélységű rétegekből származó porminták pH-értékét bemutató *20.17. ábrán* jól látszik, legjelentősebb változás a CO_2-térben tárolt C12 jelű be-

20.19. táblázat. Négy hónapig CO_2-térben tárolt betonhasábok pormintáinak kémiai vizsgálati eredményei

Beton jele MSZ 4719:1982 szerint	Vizsgált réteg mélysége, mm	pH	Izzítási veszteség, tömeg%	Kalcium-karbonát-tartalomból származó tömegveszteség, %*
C12	0–5	9,31	8,53	6,2
	5–10	9,95	7,00	4,2
	10–25	10,30	6,16	4,2
	25–40	11,60	5,88	4,1
C20	0–5	10,21	9,02	7,8
	5–10	11,70	8,37	6,7
	10–25	12,05	6,13	5,2
	25–40	12,45	6,01	4,9

*500 és 900 °C közötti tömegveszteségből számított tájékoztató érték.



20.17. ábra. Különböző gázterekben tárolt betonhasábok pormintáinak pH-értéke (Kezelési idő: 4 hónap) [*Balázs–Csányi* (2001)]

ton esetén következett be, ahol 25–40 mm-es mélységben is 12 alatt volt a pH. A *20.18. ábrán* bemutatott fénykép szerint ez esetben már a betonon is észlelhető volt rozsdanyom a kísérleti hasáb töretén. A SO_2-os térben kezelt C12-es jelű betonhasábok pH-értéke szintén jelentős csökkenést mutatott.

20.18. ábra. Acélbetétet tartalmazó elhasított beton próbatest (Tárolótér: CO_2, beton jele: C12, kezelési idő: 4 hónap) [*Balázs–Csányi* (2001)]

A laboratóriumban tárolt hasábok is karbonátosodtak a legfelső, 5 mm-es rétegben (pH: 10,7, illetve 10,9), de ez alatt már 12,3, illetve 12,4 volt a porminták kémhatása, a betonok szilárdságától függetlenül. Gyakorlatilag hasonló értékeket mértünk a NO_2-dal kezelt mintákon és a nagyobb szilárdságú, SO_2-ban tárolt mintán is.

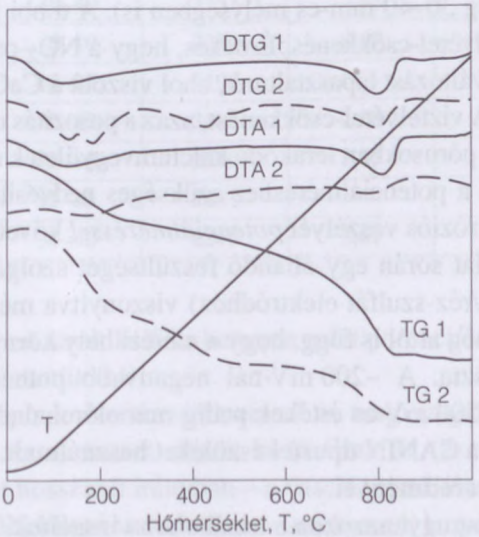
A 0–5 mm-es és 10–25 mm-es rétegekben meghatározott, híg sósavval oldható CaO és SiO_2 mennyiségéből számított CaO/SiO_2 arány (*20.20. táblázat*) lényegesen különbözik az egyes tároló terek mintáinál. Míg a laboratóriumban tárolt beton próbatestek esetén a CaO/SiO_2 arány 3,2–3,6 közötti, azaz cementekre vonatkozó értékekhez közeli, addig a gázterekben – változó nagyságban – ettől jelentősen eltér. A CO_2-kezelés okozta a legnagyobb változást: a kisebb szilárdságú beton mindkét vizsgált rétegében jelentősen megnőtt a CaO mennyisége a SiO_2-hoz képest (14,3, ill. 14,7 az arány). A SO_2-kezelés a legkülső rétegben okozott hasonló nagyságú változást (16,9 az arány). Jól észlelhető a CaO-mennyiség növekedése a gázterekben tárolt többi beton külső rétegében is. Legkisebb változást itt a NO_2-os kezelés mutatott.

A derivatográfiás felvételek alapján a jó állapotú betonokra jellemző kalcium-hidroxid bomlási csúcsot a levegőn tárolt minták külső és belső rétegében egyaránt azonosítani lehetett, és a CO_2-térben tárolt mintát kivéve, a többi beton belső rétegében is.

Legjelentősebb változást a kis szilárdságú (C12), SO_2-térben tárolt beton külső rétegét bemutató derivatográfiás felvételen (*20.19. ábra*) észleltük: lényegesen nagyobb intenzitású volt a gipszcsúcs, hiányzott a kalcium-hidroxid-fázis, ugyanakkor 320–380 °C között, feltehetően a kalcium-alumínium-hidrát bomlási csúcsa jelent meg. Utóbbi fázist – kis mennyiségben – a NO_2-térben tárolt, kis szilárdságú betonok külső rétegében is felismertük.

20.20. táblázat. A CaO/SiO_2 arány a különböző tárolóterek, a beton minősége és a vizsgált réteg mélysége függvényében

Tárolótér	Beton jele MSZ 4719:1982 szerint	Vizsgált réteg mélysége, mm	Számított CaO/SiO_2 arány
Levegő	C12	0–5	3,6
		10–25	3,5
	C20	0–5	3,3
		10–25	3,2
CO_2	C12	0–5	14,7
		10–25	14,3
	C20	0–5	9,2
		10–25	3,8
SO_2	C12	0–5	16,9
		10–25	3,4
	C20	0–5	7,2
		10–25	3,5
NO_2	C12	0–5	6,6
		10–25	3,5
	C20	0–5	3,7
		10–25	3,3



20.19. ábra. C12 jelű beton külső, 0–5 mm mélységű rétegéről készített derivatogram. 1. levegőn tárolt, 2. SO_2-dal dúsított térben tárolt

Ezek az eredmények jól egyeznek a röntgendiffrakciós felvételekkel. A röntgenfelvételeken természetesen az adalékanyag kvarctartalma, valamint a karbonátfázis és az adalékanyag egyéb ásványos alkotói (albit, dolomit stb.) domináltak. Ettringitet egyetlen esetben sem tudtunk kimutatni. A diffraktogramok elemzése alapján a SO_2-dal kezelt minta külső rétegében alumínium-oxid-hidrát jellemző vonalát, a NO_2-dal kezelt mintáéban pedig magnézium-nitrátét lehetett azonosítani. Mindkét felismerés a kezelés hatására végbemenő fázisátalakulásokra utal.

Vizsgáltuk a beton próbatestek fizikai jellemzőit is.

A gázterekben tárolt betonhasábok egyik véglapja felől különböző mélységű szeleteket vágtunk, száraz szeleteléssel. Ezeket az egyes fizikai jellemzők (sűrűség, testsűrűség, vízfelvétel) vizsgálatához úgy készítettük elő, hogy a gázok behatolása okozta változást tanulmányozhassuk. A 0–10 mm-es felső réteget teljes egészében felhasználtuk a vizsgálatokhoz, a 15–25, illetve 30–40 mm mélységűeknek viszont csak a külső, kb. 20 mm-es sáv eltávolítása után megmaradt részét. Ezeken a darabokon telítési vízfelvételt, majd – a folyadékkiszorítás elve szerint – testsűrűséget határoztunk meg; porított részleteiken pedig piknométeres módszerrel sűrűséget mértünk. A vizsgálatok eredményét a *20.21. táblázatban* foglaltuk össze.

A különböző gázterekben tárolt betonhasábok rétegmintáinak fizikai jellemzői (testsűrűség, sűrűség, porozitás és vízfelvétel) közül utóbbi mutatott egyértelmű és jellegzetes változást. A levegőn tárolt minták vízfelvétele 5,2–5,9 tömeg% közötti, gyakorlatilag a beton minőségétől és a réteg mélységétől alig függ. A gázterek mintái esetén mért értékek gyakorlatilag hasonló tendenciát mutatnak, mint amit a CaO/SiO_2 arány változásánál észleltünk. Legjobban a CO_2-dal kezelt, C12-es beton esetén csökkent a vízfelvétel (még 30–40 mm-es mélységben is). A többi minta külső rétegében volt számottevő vízfelvétel-csökkenés. Érdekes, hogy a NO_2-os légtérben tárolt minták esetén is hasonló változást tapasztaltunk, ahol viszont a CaO/SiO_2 arány csak kismértékben változott. A vízfelvétel-csökkenést, azaz a porozitás csökkenését a gázterek hatására képződő és a pórusokban lerakódó kalciumvegyületek okozták, mennyiségük növekedésében pedig a potenciálméréshez szükséges nedvesítésnek is volt szerepe.

Az acélbetétek korróziós veszélyét *potenciálméréssel* követtük nyomon.

A potenciálvizsgálat során egy állandó feszültséget szolgáltató referenciaelektródhoz (általában réz/réz-szulfát elektródhoz) viszonyítva mérjük az acél polarizációját. A mért feszültség attól is függ, hogy a mérési hely környezetében a betonacél felülete mennyire tiszta. A –200 mV-nál negatívabb potenciálértékek korróziós folyamatra utalnak, –500 mV-os értékek pedig már előrehaladott mértékű korróziót jeleznek. A vizsgálatra CANIN típusú készüléket használtunk.

A potenciálmérés eredményei

A potenciálváltozást ugyanazokon a hasábokon vizsgáltuk, mint amelyeken a kémiai változásokat. A vizsgálat időtartama 4 hónap volt. A potenciálértékeket a hasábok bedolgozással ellentétes felületén 5-5, előre megjelölt ponton havonta mértük. Vizsgálat előtt a felületet vízpermetezéssel nedvesítettük.

20.21. táblázat. Agresszív gázterekben tárolt betonhasábok szeletelt mintáinak fizikai jellemzői

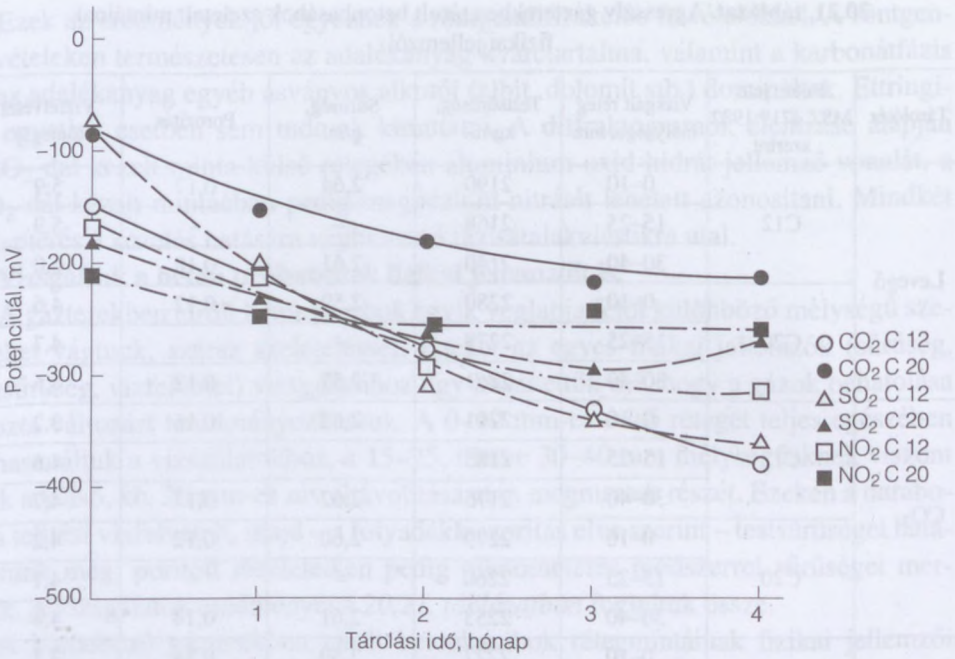
Tárolótér	Beton jele MSZ 4719:1982 szerint	Vizsgált réteg mélysége, mm	Testsűrűség, kg/m^3	Sűrűség, g/ml	Porozitás	Vízfelvétel tömeg%
Levegő	C12	0–10	2190	2,64	0,17	5,9
		15–25	2168	–	–	5,9
		30–40	2140	2,61	0,18	6,0
	C20	0–10	2280	2,59	0,12	4,6
		15–25	2278	–	–	4,7
		30–40	2261	2,57	0,12	4,6
CO_2	C12	0–10	2201	2,62	0,16	3,2
		15–25	2185	–	–	4,6
		30–40	2175	2,62	0,17	4,7
	C20	0–10	2279	2,60	0,12	4,2
		15–25	2260	–	–	4,1
		30–40	2253	2,61	0,14	4,4
SO_2	C12	0–10	2227	2,59	0,14	3,1
		15–25	2130	–	–	5,3
		30–40	2165	2,64	0,18	5,6
	C20	0–10	2288	2,60	0,12	3,8
		15–25	2260	–	–	4,2
		30–40	2253	2,62	0,14	4,1
NO_2	C12	0–10	2236	2,60	0,14	3,2
		15–25	2190	–	–	4,9
		30–40	2184	2,60	0,16	5,9
	C20	0–10	2340	2,63	0,11	3,6
		15–25	2281	–	–	4,4
		30–40	2245	2,61	0,14	4,2

A különböző terekben tárolt kétféle betonon mért potenciálértékek időbeli változását a *20.20. ábrán* tüntettük fel.

Az acélbetétek állapotát szemrevételezéssel is megvizsgáltuk. Erre a hasábok egyéb vizsgálatokból visszamaradt részeit használtuk fel (ezek körülbelül félhasábok voltak), amelyeket hosszanti irányban – a vasalás vonalában – elhasítottunk.

A szabaddá vált acélfelület és a betonban visszamaradt lenyomat szemrevételezésével a *20.22. táblázatban* összefoglaltakat állapítottuk meg.

Laboratóriumi kísérleteink során már a kiinduló értékek –82 mV és –214 mV közötti, viszonylag nagy negatív értékek voltak, amit sem a hasábok eltérő szilárdságá-



20.20. ábra. Különböző gázterekben tárolt betonhasábok acélbetéteinek potenciálértéke a vizsgálat tartama függvényében. (Kezelési idő: 4 hónap) [*Balázs–Csányi* (2001)]

val (porozitásával), sem az acélbetétek helyzetével (2 és 5 cm közötti mélységben voltak) nem lehetett indokolni. Legnegatívabb potenciálértékeket a 4 hónapig CO_2- és SO_2-térben tárolt C12 jelű betonok esetén mértünk (–360 és –380 mV), és itt volt a legnagyobb a potenciál változása is. A szemrevételezéssel nyert megfigyelések alátámasztották a vizsgálati eredményeket: ezekben a betonmintákban már elkezdődött a betonacélok rozsdásodása, sőt rozsdanyomokat – a hasábok elhasítása után – már a betonon is észleltünk a vasalás nyomvonalában.

A NO_2-térben tárolt C12 jelű betonon mért potenciálérték alig haladta meg a –300 mV-ot, és szemrevételezéssel itt is meg lehetett figyelni enyhe rozsdásodást, de az előbbieknél kisebb mértékűt; itt az acélbetét nyoma a betonban még rozsdától mentes volt.

Ezek a mérési eredmények és megfigyelések arra utalnak, hogy egy évesnél öregebb és kis nedvességtartalmú betonok esetén a betonacél korróziója még extrém mennyiségű agresszív gázt (SO_2, NO_2), illetve CO_2-ot tartalmazó környezetben is csak korlátozottan megy végbe. Itt a betonok csak annyi nedvességet kaptak, ami a potenciálmérés elvégzéséhez volt szükséges.

A NO_2-kezelés eredményeként a nitrátion-koncentráció a beton 5 mm-es kérgében 2,5 m% (C12 jelű beton), illetve 1,5 m% (C20 jelű beton) volt. A porozitástól egyértelműen függött a behatolás mélysége is.

20.22. táblázat. Négy hónapig agresszív gázközegekben tárolt betonhasábok acélbetéteinek állapota szemrevételezéssel. Egyéb megfigyelések

Tárolótér	Beton jele MSZ 4719:1982 szerint	A betonacél állapota	Egyéb megfigyelés
Levegő	C12	Felülete fémes	–
	C20	Felülete fémes	–
CO_2	C12	Keresztbordákon rozsda	Rozsda a beton felületén
	C20	Felülete enyhén rozsdás	Alig észlelhető rozsda beton felületén
SO_2	C12	Enyhén rozsdás	A beton felülete 2–5 mm mélyen sárga
	C20	Egyik hosszanti oldalon enyhén rozsdás	A beton felülete sárga
NO_2	C12	Felülete fémes	A beton felülete sárga
	C20	Felülete fémes	A beton felülete sárga

A légszennyező anyagok okozta kémiai átalakulások hatása a CaO/SiO_2 arány változásában is megnyilvánult. Laboratóriumban tárolt próbatestek külső kérgében ez az arány 3,2–3,6 közötti, ugyanakkor SO_2-kezelés hatására 16,9, CO_2 hatására kb. 14, míg NO_2 hatására csak maximum 6,6 volt.

Az alkalmazott kísérleti körülmények között legnagyobb mértékű pH-csökkenés a CO_2-térben kezelt betonok esetén következett be (a C12 jelű beton 25–40 mm-es rétegében is 12 alatti volt), legkisebb pedig a NO_2 hatására.

A potenciálmérés eredményei összhangban voltak a kémiai vizsgálatokkal és a pH-mérés eredményeivel: legnegatívabb potenciált és egyúttal a legnagyobb változást a C12 jelű, CO_2-térben tárolt betonokon mértünk, ahol az acélbetétek rozsdásodása már szemmel láthatóan is elkezdődött. Feltételezhető, hogy legalább C20 jelű betonban, legalább 20 mm betonfedés és kis nedvességtartalom esetén nem következik be az acélbetét korróziója még extrém mennyiségű légszennyeződés hatására sem.

20.5. Összefoglalás

Az ipari termelés és a közúti közlekedés jelentősen terheli a levegőt, elsősorban SO_2 (kén-dioxid) és NO_x (nitrogén-oxidok) kibocsátása által.

Meglévő szerkezetek vizsgálata, valamint modellkísérletek során azt kutattuk, hogy a kapilláris pórusokon át a betonba jutó légszennyező anyagok okoznak-e károsodást a betonban, vasbetonban.

Ehhez először légszennyezési térképeket készítettünk 1990-től 2005-ig, majd a térképek alapján kiválasztott vasbeton szerkezeteket megvizsgáltuk.

Valamennyi műtárgy betonjában észleltük a légszennyező SO_2 okozta gipszképződést. Ez a beton külső 10 mm-es kérgében volt a legnagyobb. Ipari üzemektől távol eső helyeken kicsi volt az értéke, míg az erősen szennyezett levegőjű körzetekben, az idősebb betonban elérte a cementtel eleve bevitt gipsznek a háromszorosát is.

Legnagyobb nitrátion-tartalmat a Borsodchem Rt. telepén lévő betonszerkezetben mértünk, oka a nitrogénműtrágya-gyár közelsége volt. Más helyeken a NO_2-szennyezés hatását elsősorban a közúti forgalom sűrűsége befolyásolta.

Legtöbb műtárgyban észleltünk – rendszerint elhanyagolható mennyiségű, de friss szennyeződésre utaló – nitritiont is.

Az M7 autópálya elbontásra szánt, Budaörs, Károly király úti felüljárójának vizsgálata azt is megmutatta, hogy az egyéb szennyeződések mellett vizsgált, téli sózás okozta kloridion-szennyeződés lenn az útpálya közelében volt a legnagyobb és felfelé rohamosan csökkent, továbbá a híd Balaton felőli oldalán nagyobb volt a szennyeződés, mint a Budapest felőlin.

Második lépésben pép-, habarcs- és betonkísérleteket végeztünk.

Kutatásaink szerint a SO_2-ból – a cement hidratációja során keletkezett kalciumvegyületekkel való reakció révén – a beton külső kérgében gipsz keletkezik. Mennyisége függ a SO_2-koncentráció nagyságától, a hatás tartamától, a cement fajtájától (pépkísérleteink során pernyeportlandcement esetén 2,5-szeres, portlandcement esetén 3,5-szeres, kohósalak-portlandcement esetén 7-szeres gipsztartalmat mértünk a cementekben lévő, a kötésidő szabályozása céljából bekevert gipszhez viszonyítva) és a beton porozitásától (ami rendszerint annál nagyobb, minél kisebb a beton szilárdsága). Porózus betonban (pl. C12 jelű beton) a szulfáttartalom az eredeti érték 7–10-szeresére nőtt. Mennyisége legnagyobb volt a külső 5 mm-es rétegben, befelé rohamosan csökkent. A keletkezett gipsz növeli a betonkéreg tömörségét, csökkenti a vízfelvételét, de – különösen kisebb szilárdság esetén – a felületi réteg szétmorzsolódását eredményezheti.

A NO_2-kezelés eredményeként a nitrátion-koncentráció a beton 5 mm-es kérgében 2,5 m% (C12 jelű beton), illetve 1,5 m% (C20 jelű beton) volt. A porozitástól egyértelműen függött a behatolás mélysége is. A beton kérgében keletkezett vegyületek ebben az esetben is megnövelték a tömörséget, ami a vízfelvétel csökkenését eredményezte.

A légszennyező anyagok okozta kémiai átalakulások hatása a CaO/SiO_2 arány változásában is megnyilvánul. Laboratóriumban tárolt próbatestek külső kérgében ez az arány 3,2–3,6 közötti, ugyanakkor SO_2-kezelés hatására 16,9, CO_2 hatására kb. 14, míg NO_2 hatására csak maximum 6,6 volt.

Az alkalmazott kísérleti körülmények között legnagyobb mértékű pH-csökkenés a CO_2-térben kezelt betonok esetén következett be, legkisebb pedig NO_2 hatására volt.

A potenciálmérés eredményei összhangban voltak a kémiai vizsgálatokkal és a pH-mérés eredményeivel: legnegatívabb potenciált és egyúttal a legnagyobb változást a C12 jelű, CO_2-térben tárolt betonokon mértünk, ahol az acélbetétek rozsdásodása már szemmel láthatóan is elkezdődött.

20.6. A kutatásból a tartósságra levont következtetés

Modellkísérletek és esettanulmányok alapján feltételezhető, hogy legalább C20 jelű betonban, legalább 20 mm betonfedés és kis légnedvesség-tartalom esetén nem következik be az acélbetét korróziója még extrém mennyiségű légszennyeződés hatására sem.

21. Sugárvédő beton

21.1. A sugárvédő beton fogalma és alkalmazási területei

[*Palotás–Balázs* (1980), *Balázs* (1984)]

A számításba jöhető fontosabb sugárzások, amelyek elleni védelemként a beton számításba jöhet, a röntgensugarak, a radioaktív α-, β- és γ-sugarak és a magreaktorokban fellépő neutronsugárzás. A sugarakat a védőfal részben elnyeli, részben szétszórja. A védekezés célja a sugárzási szint olyan mértékű csökkentése, hogy az az emberi szervezetre ne legyen káros.

A röntgensugárzás kis része hasznos sugárzás, amely a terápia és a diagnosztika céljaira szolgál. A nagyobb része a káros sugárzás és a sugárzást ért testek szekunder sugárzása. Védekezni ólomréteggel, vagy ezt helyettesítő egyéb anyagokkal (vas, horgany, baritvakolat, beton stb.) szokás. Az ólom-, illetve ólomegyenérték-vastagság a csőfeszültségnek, az áramerősségnek, a röntgencső fókuszának, a védett hely távolságának és a helyettesítő anyag testsűrűségének a függvénye. Részletes előírásokat tartalmaz az MSZ 824 és 836. Ezeknek a szabványoknak az utolsó változatát 1999-ben adták ki. A tapasztalatok szerint a szokványos adalékanyaggal készített beton (200 kV csőfeszültségig) legalább 2400 kg/m^3 testsűrűségű, e felett célszerűen legalább 3000 kg/m^3 testsűrűségű, akkor 30 cm vastagságban elegendő a röntgensugárzás elleni védelemre.

Az α- és β-sugarak leárnyékolása mm-rendű anyagvastagsággal megoldható.

A γ-sugarak a röntgensugarakkal rokon tulajdonságúak, de energiájuk nagyobb, ezért vastagabb ólomfalra, vagy más, azt helyettesítő anyagra van szükség. A γ-sugarak elleni védelemre nagy atomtömegű és nagy testsűrűségű anyagokat kell használni. Ide megfelelő tehát a **nehézbeton.**

A neutronsugárzást vízréteggel lehet lassítani, de a másodlagos γ-sugárzás miatt ez nem elegendő. A neutronsugárzás elleni védelmül tehát a **nagy testsűrűségű és nagy hidrátvíztartalmú betonok** előnyösek. A reaktortartályok védelme során a beton szilárdsági, hőtani és sugárvédelmi tulajdonságait egyaránt ki lehet használni.

A nehézbeton – az MSZ 4798:2004 szabvány szerint tömegállandóságig 60 °C-on kiszárított állapotában 2600 kg/m^3-nél nagyobb testsűrűségű beton. Ha nincs külön megadva, akkor a testsűrűség a nehézbeton 28 napos korára értendő.

A nehézbetont a reaktorok, ciklotronok sugárvédő szerkezetei, óvóhelyek, sugárzó hulladékot tároló szerkezetek stb. készítésére használják fel.

A tapasztalati és elméleti meggondolások alapján a reaktorsugárzás-védő beton legfontosabb tulajdonságai: nagy tömörség, nagy testsűrűség, lehető nagy víztarta-

lom, kis hidratációhő, nagy fajhő, jó vezetőképesség, kis hőtágulás, rugalmassági modulus és zsugorodás, nagy húzószilárdság.

21.2. Sugárvédő betonok anyagai

Sugárvédelmi célra eddig többnyire portlandcementet használtak, amely hosszabb üzemelés utáni védőbetonból vett minták alapján jónak bizonyult.

A kis hőfejlesztésű és kis zsugorodású cementeket kell előnyben részesíteni. Ajánlható a CEM I.32,5 S jelű (szulfátálló cement) és a CEM II/A 32,5 jelű cement.

A közönséges kavicsbeton közepes víztartalommal relatíve jobb védőanyag a neutronsugárzásra, mint a γ-sugárzásra, s ezért a méretezésnél általában a γ-sugárzás a mértékadó. A γ-sugárzás és a nagy energiájú neutronsugárzás gyengítésének javítása céljából célszerű nehéz adalékanyagok használata, melyeknek testsűrűsége 3,5-nél nagyobb. Így a barit ($BaSO_4$), magnetit (Fe_3O_4), limonit ($2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$) stb. A limonitot főképp a mintegy 10%-os hidrát-víztartalma miatt alkalmazzák szívesen („hidrátbeton"). Hazai kísérletek szerint hidrátbeton számára a bauxit ($Al_2O_3 \cdot 2H_2O$), s általában a nehézbeton számára a nehéz nagyolvasztó-rézsalakok is tekintetbe jöhetnek [*Kunszt* (1957, 1958), *Budai* (1977)]. A testsűrűség növelése céljából előnyös a fémvas adagolása (acélsörét, acélhulladék stb.). Abból a célból, hogy a kemény γ-sugárzás keletkezése nélküli neutronbefogás valószínűségét növeljük, kedvező a betonhoz bórvegyületeket pl. kolemanitércet ($2CaO \cdot 3B_2O_3 \cdot 5H_2O$), esetleg bóraxot ($Na_2B_4O_7 \cdot 10\,H_2O$), borokalcitot ($CaO \cdot 2B_2O_3 \cdot 9H_2O$) adagolni.

A felhasznált adalékanyag szemmegoszlására a szokásos előírásokat kell betartani. A nehéz adalékanyagok közül azokat, amelyeknek nem elegendő nagy a saját szilárdsága (pl. barit), általában kisebb (0/10 mm) szemnagysággal használjuk. A nehéz adalékanyagoknál a szemmegoszlás helyes felépítése nem mindig tartható. Ólomércek használata esetén, minthogy ezek a cementet megtámadják, a kötőanyag anhidrit vagy magnezit lehet. Egyes adalékanyagok, pl. bórax, bórfrit, kolemanit, meghosszabbítják a cementkötés idejét. Ez kalcium-aluminát-cementtel (lumnit) kompenzálható.

21.3. A nehézbeton készítése

A beton készítéséhez használt cement nem lehet 2 hónapnál régebbi, hőmérséklete 8–12 °C. Az adalékanyag szennyezett lehet. Ezért az 5 mm-nél kisebb frakciókat célszerű kimosni. A vasat és acélt meg kell tisztítani az olajtól, zsírtól, mert a cement nem tapad hozzá. Bevált a gőzsugár. A rozsdától rendszerint nem tudjuk megtisztítani. A vashulladék lehetőleg gömb alakú legyen.

Az anyagokat tömeg szerint kényszerkeverőben kell keverni. A konzisztencia kevéssé képlékeny. A betont úgy kell bedolgozni, hogy az adalékanyag ne osztályozódjék.

A nehéz adalékanyagú betonok nehezebben keverhetők és dolgozhatók be, mint a közönséges betonok. A szétkeveredési veszély fennáll. A betont szokásos betonkeverőkben keverjük. (A keverő hasznos térfogatát a nagyobb testsűrűség miatt kihasználni nem szabad.) Törekedni kell az egyenletes betonstruktúrára, a munkahézagok alkalmazását kerülni kell. Lágy kőzetek esetén az erőteljes vibrálás kedvezőtlen lehet. Néhány hazai betonösszetételt és adatot tartalmaz a *21.1. és 21.2. táblázat.*

A betonozáshoz betontechnológiai utasítást és minőség-ellenőrzési tervet kell készíteni. Ezeket szigorúan be kell tartani. A helyszínen ellenőrizni kell minden szállítmánynál a beton hőmérsékletét és a beton konzisztenciáját. Ha a beton konzisztenciája nem megfelelő, akkor a szállítmányt vissza kell utasítani.

21.4. Színesfémsalak adalékanyagú nehézbeton

[*Balázs–Kilián–Kontúr* (1960)]

21.4.1. Bevezetés

A nehézbeton gazdasági előnyének fontos előfeltétele, hogy ne legyen drágább, mint a közönséges beton. A sugárvédelmi betonok – a szokásos érc- és vashulladék-adagolás esetén – jóval többe kerülnek, mint a szokásos betonok. Található azonban olyan nehéz adalékanyag is, amely ipari hulladék, és amelyből kevés költséggel beton adalékanyag készíthető. Hazánkban a Metallochémia nagytétényi gyártelepén fél évszázada halmozódik fel a réz és ólom salakja. *Kontúr* György javasolta ennek az anyagnak a betonadalékanyagként való felhasználását, vagyis nehézbeton készítését színesfémsalak adalékanyaggal. A MÉLYÉPTERV 1959 elején megbízta az Építőipari és Közlekedési Műszaki Egyetem II. sz. Hídépítéstani Tanszékét a színesfémsalak nehézbeton kísérleti vizsgálatával. A Tanszék már korábban is foglalkozott a színesfémsalakkal – néhány egyetemi hallgató bevonásával – tudományos diákkörben.

21.4.2. A színesfémsalak adalékanyag tulajdonságai

A Metallochémia réz-, illetve ólomsalakjával, mint beton adalékanyaggal foglalkozva megvizsgáltuk a salakok sűrűségét, szilárdságát, apríthatóságát, időállóságát. Megvizsgáltattuk ezenkívül a rézsalak kémiai összetételét is. Ahol mód volt rá, összehasonlítottuk az eredményeket a Tanszéken vizsgált, ismert beton adalékanyagok adataival.

A továbbiakban a kevert réz- és ólomsalakot általánosan színesfémsalaknak nevezzük.

21.1. táblázat. Néhány hazai nehéz- és hidrátbeton összetétele [*Palotás–Balázs* (1980)]

A beton megnevezése	ρ_t kg/m³	cement kg/m³	hematit	limonit	barit	normál	vas	nehéz adalék	m_w/m_c	Nyomószilárdság MPa
			homok 0/4 mm				D~63 mm			
Hematit beton	4550	300					2810	700	0,47	20,0
Hematit beton	3370	300	650			600	1950	0,55	18,0	
Limonit beton	3540	350	750		300	1500	750	0,54	20,0	
Barit beton	3370	300			1320			1610	0,47	
Fémsalak beton	3190	290				277		2492	0,45	35,0

21.2. táblázat. Különféle adalékokkal elérhető betontestsűrűség (kg/m³) (cement ~300 kg/m³) [Palotás–Balázs (1980)]

Az adalékanyag		A beton elérhető testsűrűsége, kg/m³	Kémiailag kötött víz kg/m³
fajtája	testsűrűsége, kg/m³		
Homokos kavics	2700	2400	60
Bazalt, mészkő	3100	2700	
Krómsalak	3400	2900	
Ólomsalak	3600	3000	
Limonit	3800	3100	340
Barit	4200	3600	60
Hematit	4500	3800	
Ilmenit	4600	3900	
Magnetit	5100	4000	
Ferrofoszfor	6300	5500	
Vas	7700	6200	

A kétféle salakot a hányón vegyesen találtuk meg. A gyakorlatban a hányón lévő rézsalakot az ólomsalaktól csak nehezen lehetne különválasztani, mert a színük és a sűrűségük közel egyező. Mint a továbbiakból kiderült, a különválasztásra nincs is szükség, mert a kétféle salak tulajdonságai – adalékanyag szempontjából – majdnem azonosak.

Az adalékanyagok sűrűségét a *21.3. táblázatban,* a beton nyomószilárdságát a *21.4. táblázatban* hasonlítottuk össze.

A nyomószilárdságokat 5–6 cm élhosszúságú kocka töréséből kaptuk és az átlagokat legalább három kockaszilárdságból számítottuk. A kavics szilárdságát nem mértük, de ismert, hogy a nagyobb kvarckavicsokból kivágott kockák 100 MPa-nál nagyobb nyomószilárdságúak.

21.3. táblázat. Az adalékanyag átlagos sűrűsége

Megnevezés	Sűrűség (t/m³)
Ólomsalak	3,67
Rézsalak	3,69
Színesfémsalak (vegyes salak)	3,67
Dunai homokos kavics	2,63
Nagyharsányi mészkő	2,72
Szarvaskői diabáz	2,85
Badacsonytomaji bazalt	2,88
Rézsalak kúp alsó része	4,81

21.4. táblázat. Néhány hazai nehéz- és hidrátbeton összetétele

A beton megnevezése	A beton összetétele, kg/m³									
	ρ_t kg/m³	cement	hematit	limonit	barit	normál	vas	nehéz adalék	m_w/m_c	f_c MPa
			homok 0|4 mm				D ~ 63 mm			
Hematit beton	4550	300				600	2810	700	0,47	20
Hematit beton	3370	300	650			300		1950	0,55	18
Limonit beton	3540	350		750			1500	750	0,54	20
Barit beton	3370	300			1320			1610	0,47	
Fémsalak beton	3190	290				277		2492	0,45	35

A színesfémsalak átlagos sűrűsége tehát 0,8–1,0 t/m³-el nagyobb, mint a szokásos adalékanyagoké. A salak sűrűsége a salaköntvény alján – a kúp alakú öntvény alsó csúcsánál – jóval nagyobb, mint a többi részen. Speciális célokra esetleg külön lehetne választani a salaköntvény alsó csúcsos részét, de csak a salaktér előrészén, ahol az öntvények még nincsenek összetörve és összekeverve.

A színesfémsalak kockaszilárdsága hasonló a diabáz és a bazalt szilárdságához.

A salakból az ÉM. Műkő és Kőipari Vállalat állított elő zúzott adalékanyagot. Az aprításnál nehézség nem merült fel, és a vállalat szerint a salak a természetes kövekhez hasonlóan zúzható. 1959-ben a Metallochémiai gyár megkezdte a salak granulálását is. (*21.5. táblázat*).

A granulált kohósalak testsűrűsége lazán 1,60 kg/ℓ, döngölve 1,82 kg/ℓ.

A salak időállóságát a hányón több évtizede tárolt anyagok szemlélése alapján jónak lehet mondani, mert mállást nem tapasztaltunk. Az időállóságot egyébként a salak struktúrája, szilárdsága és kémiai összetétele is megerősíti. A rézsalak a Dunai Vasmű 1958. évben készített elemzései szerint kb. 32% SiO_2, 32% FeO, 6% Al_2O_3, 13% CO, 0,7% S, 1% CuO, 1% PbO, 5% ZnO tartalmú.

21.5. táblázat. A granulált kohósalak szemmegoszlása

Lyukbőség, mm	Áthullott tömeg, %
0,24	3
1,00	23
3,00	77
5,00	91

21.4.3. A színesfémsalak nehézbeton tervezése

A zúzott színesfémsalak betonadalékanyaggal szemben ugyanazokat a követelményeket támasztjuk, mint a zúzottkővel szemben. A zúzásnál nyert salaklisztet csak kis mennyiségben szabad felhasználni a beton adalékanyagában a finom szemcsék pótlására.

Az adalékanyag nagy portartalma esetén a szilárdság csökken. Ajánlatos a 0,02 mm-nél kisebb részek felső határértékére az egykori ME 19–54 előírásait betartani, amelynek mai megfelelője a MÉASZ ME-04.19:1995 műszaki előírás 12. fejezete.

A salakzúzalék éles szemcséjű, a finom szemcséket a bazalt betonoknál ismert módon homokkal, vagy homokos kaviccsal kell pótolni. A homok és zúzott salak optimális keverési arányát próbabetonozás útján lehet megállapítani. A granulálás a finomabb fémsalak bedolgozását is lehetővé teszi.

A salak adalékanyag testsűrűsége a szemmegoszlástól függően 2–2,5 t/m^3 között van. Az adalékanyag testsűrűségét, illetve a bedöngölési tényezőt ismerve, meg lehet határozni a beton habarcstartalmát és ebből a homoktartalmat.

Ismeretes, hogy a legnagyobb szemnagyság növelésével nő a beton testsűrűsége is, tehát nehézbeton tervezésénél – a lehetőségekhez mérten – növelni kell a szemnagyság felső határát.

A túlságosan sok finom szemcsét tartalmazó betonhoz sok víz kell, és ezért kisebb lesz a beton testsűrűsége és szilárdsága. A kevés finom szemcsét, illetve kevés habarcsot tartalmazó betonnál pedig a hézagosság veszélye fenyeget.

Az adalékanyag szemmegoszlását illetően elfogadható a *Palotás* (1952) által kidolgozott képlet, ahogyan azt a zúzott adalékanyagokra előírta. Esetleg további 2–3%-os csökkentést javasolunk a finomsági modulusnál a beton nehéz bedolgozhatósága miatt. Alkalmazható itt is a lépcsős szemmegoszlás, ami gazdasági előnnyel is jár az adalékanyag aprítását illetően.

Általában a zúzott salak szemmegoszlásától és a beton összetételétől függően 1 m^3 betonban 0,30–0,50 m^3 habarcsra lehet számítani. Ez azt jelenti, hogy 3,67 t/m^3 átlagos sűrűségű színesfémsalakot feltételezve, optimális keverék esetén a friss beton testsűrűsége 2,95–3,20 t/m^3 lehet, ami persze nagymértékben függ a bedolgozás mértékétől és módjától is. A gyakorlatban a jól tervezett és készített színesfémsalak nehézbeton esetén 3,1–3,2 t/m^3 testsűrűség vehető alapul. Ez a testsűrűség a beton szabályos utókezelése esetén 1 hónap alatt kb. 1–3%-kal csökken. A homok egy része helyett granulált rézkohósalak felhasználása esetén a testsűrűség 3,3 t/m^3-re becsülhető.

21.4.4. Néhány kísérleti eredmény

A MÉLYÉPTERV megbízása értelmében és a Tanszék tudományos diákkörének munkája közben megvizsgáltuk 200–400 kg/m^3 közötti cementadagolás esetén 15 különböző keverési arányú nehézbeton testsűrűségét és szilárdságát. A betonokhoz 500-as (mai 32,5 MPa szilárdságú) cementet használtunk. A vizsgálatokból a továbbiakban ötféle beton adatait közöljük.

A betonokat kézi keverés után tűvibrátorral tömörítettük 20 cm élhosszúságú acél kockasablonokban. Az utókezelés 7 napos korig nedvesen tartás, majd törésig sza-

bad levegőn való tárolás volt. A tárolóhelyen a hőmérséklet +16 és +25 °C között változott. A betonok összetételét a *21.6. táblázat* mutatja. Az A, B, C jelű folytonos szemmegoszlású adalékanyag összetétele a *21.7. táblázatban* található.

21.6. táblázat. Színesfémsalak nehézbetonok összetétele

A beton jele	Cementadagolás, kg/m³	Víz-cement tényező	A friss beton térfogatsúlya, t/m³	Az adalékanyag
I.	235	0,55	3,11	0–1 mm homok 10% 1–40 mm salak 90% (B jelű adalékanyag)
V.	290	0,45	3,18	0–1 mm homok 5% finom őrölt salakpor 5% 1–40 mm salak 90% (A jelű adalékanyag)
VI.	290	0,45	3,19	0–1 mm homok 10% 1–40 mm salak 90% (A jelű adalékanyag)
VIII.	340	0,40	3,20	Finom őrölt salakpor 4% 1–40 mm salak 96% (C jelű adalékanyag)
X.	350	0,40	3,23	0–5 mm homok 10% 3–15 mm salak 30% 15–25 mm salak 30% 25–40 mm salak 30%

21.7. táblázat. Színesfémsalak nehézbetonok nyomószilárdsága

A beton jele	Testsűrűség vizsgálatkor N/mm²	Átlagos kockaszilárdság N/mm²	Megjegyzések
I.	3,06	33,4	–
V.	3,13	41,5	–
VI.	3,15	45,2	–
VIII.	3,16	48,7	Igen nehezen tömöríthető
X.	3,20	56,8	–

A színesfémsalak nehézbetonok nehezebben keverhetők meg jól, mint a kavicsbetonok, mert a szemcsék élesek és ezenkívül a habarcs jóval kisebb testsűrűségű a salak testsűrűségénél.

A zúzott adalékanyagokkal készített betonok bedolgozása elég nehéz, különösen a habarcsszegény betonoké és kevés víz adagolása esetén. A közönséges betonok bedolgozásánál is intenzívebb bedolgozást igényelnek a nehézbetonok. Ezért ajánlatos konzisztenciajavító adalékszerek alkalmazása.

Az itt közölteknél nagyobb testsűrűség érhető el bizonyára akkor, ha a legnagyobb szemnagyság 80–100 mm. Tömegbeton esetén legjobb lenne prepakt eljárást alkalmazni, mert ezzel a módszerrel a Metallochémia gyár hányóján található színesfémsalakot esetleg zúzás nélkül is fel lehetne használni, ami a testsűrűséget is növelné, és még olcsóbbá tehetné a betont.

Ezek kipróbálására eddig nem volt módunk, így csak a vibrált betonra tudunk adatokat közölni. A *21. 6. táblázatban* feltüntetett összetételű betonok 28 napos korban mért nyomószilárdságát, illetve a kockaszilárdságok átlagértékeit a *21.7. táblázatban* közöljük. Az átlagokat 3–3 kocka szilárdságából számítottuk.

Megvizsgáltuk 300 kg/m^3 500-as cementadagolással és 32 mm legnagyobb szemnagysággal készített, 3,2 t/m^3 testsűrűségű nehézbeton zsugorodását. A zsugorodás átlagértéke – szabad levegőn való tárolás esetén – 1 hónapos korban 0,12 mm/m volt, tehát nem nagyobb, mint a hasonló összetételű és készítésű bazaltbetonok zsugorodása. A folytonos szemszerkezetű színesfémsalak adalékanyag a *21.8. táblázatban* látható.

21.8. táblázat. A folytonos szemszerkezetű színesfémsalak adalékanyag

Szemnagyság (mm)	Az egyes frakciók aránya súlyszázalékban			Megjegyzések:
	A	B	C	
0–1	10	10	4	Az 1 mm alatti szemcséknél a táblázat szerinti mértékben homokot, vagy finomra őrölt salakport adatoltunk.
1–2,5	7	14	5	
2,5–5	12	7	9	
5–15	33	35	32	
15–25	13	15	22	
25–40	25	19	28	

21.4.5. Összefoglalás

Az előbbiekben ismertetett rövid vizsgálataink szerint a Metallochémia gyár telepén felhalmozódott színesfémsalak nehézbetonok készítésére alkalmas lehet. A színesfémsalak adalékanyaggal készített betonok testűrűsége kb. 0,80 t/m^3-rel nagyobb, mint a közönséges betonoké. Emellett a betonok szilárdsága is kielégítő. Meg kellene még vizsgálni a betonok időállóságát, különösen a hőállóságot és fagyállóságot.

A színesfémsalak ipari hulladék ára a Metallochémia, Budapest, nagytétényi telepén vagontételben 527,65 Ft/10 tonna (1960-ban). Ez az ár egyaránt vonatkozik mind a granulált, mind a hányón található darabos anyagra. Szeretnénk felhívni illetékesek figyelmét arra, hogy aránylag mérsékelt költséggel ebből az anyagból speciális nehézbeton állítható elő.

21.5. A Paksi Atomerőmű betonfalai betonjának tulajdonságai

21.5.1. Anyagjellemzők

[*Balázs–Fehér–Szombathy–Tóth–Zsigovics* (1982)]

21.5.1.1. A kísérlet terve

A kutatás kétféle betonra vonatkozott; a kötött 2380 kg/m^3 testsűrűségűnek nevezett betonra és a nehézbetonra. Ezeknek a betontechnológiai utasítás szerinti összetételét a *21.9. táblázat* tartalmazza.

21.9. táblázat. A betonok összetétele a technológiai utasítás szerint

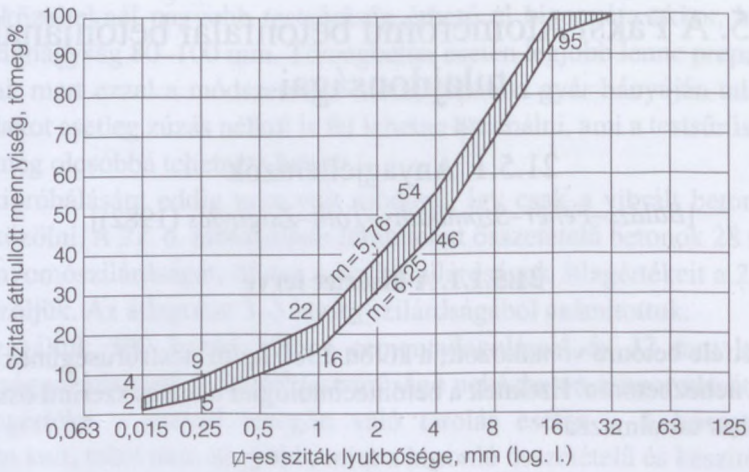
Alkotó anyagok	Az alkotó anyagok mennyisége (kg/m^3), ha a beton jele		
	kötött testsűrűségű beton		nehézbeton
	B200/140	B280/200	NB200/140
Beremendi 350 ppc 10	285	330	320
Homokos kavics	1920	1880	–
Készítési víz	175	175	210
Acélsörét			1754
Hematit			1666
Készítési testsűrűség	2380	2385	3950

A keverővízben a Plastoxol képlékenyítőszer is benne van, 0,4 m% a cementre vonatkoztatva. Továbbá Lentan-A kötéskésleltető adalékszer használatának a lehetőségét is számításba vettük arra az esetre, ha a beton hőmérsékleti viszonyai ezt megkívánják. A szemmegoszlásra a szivattyúzható betonnak megfelelő határgörbét adtak meg (*21.1. ábra*).

A megépített beton összetétele már tükrözte a ténylegesen felhasznált anyagokat és a testűrűség kivételével kismértékben eltért a *21.1. táblázatban* megadott összetételtől. A megadott összetételt a *21.10. táblázat* tartalmazza. Az acélgolyók kb. 4 mm átmérőjűek, gömb alakúak és fényes felületűek voltak.

A kísérleti tervet a *21.11. táblázat* szemlélteti. A táblázathoz az alábbi magyarázatot fűzzük; a 4–6 és a 9 jelű beton nehézbeton volt, míg a több kötött testsűrűségű betont túlnyomóan kvarcalapú homokos kavics adalékanyaggal készítettük.

A cement 10% pernyét tartalmazó portlandcement volt. A zárójeles értékek a tényleges, a zárójel nélküliek a tervezett összetételt jelentik.

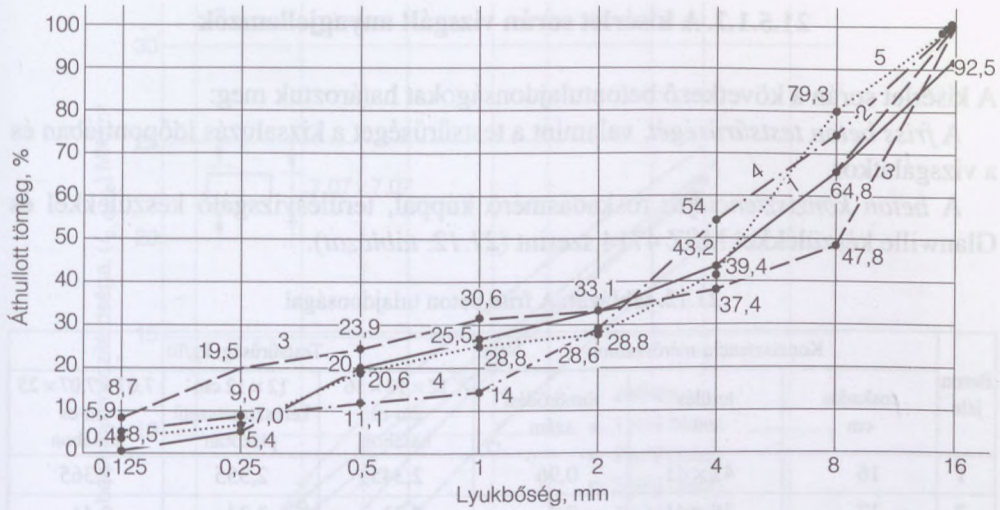


21.1. ábra. A szemmegoszlási határgörbék ∅16 mm legnagyobb szemnagyság esetén

21.10. táblázat. A betonok összetétele a kivitelező vállalat szerint

Alkotó anyagok	Az alkotó anyagok mennyisége (kg/m³), ha a beton jele	
	kötött testsűrűségű beton, jele: B	nehézbeton, jele: NB
	B 200/140	NB 200/140
Beremendi 350 ppc 10	300	320
Készítési víz	150	180
Paksi bányahomok	125	301
Paksi osztályozatlan	1000	
Hegyeshalmi 15/25 kavics	800	
Hematit		1308
Acélsörét 3 frakcióban		1845,5
Kloridmentes Plastoxol		1,3
Készítési testsűrűség	2375	3957,8

Az adalékanyagok szemmegoszlását a *21.2. ábra* szerint kell érteni. Az 1 és 3 jelű szemmegoszlás a kivitelező által megadottnak felel meg. Az acélgolyót nem vettük bele a szemmegoszlási görbébe. A 4 és 5 jelű adalékanyaggal a határgörbéket igyekeztünk megközelíteni. A 10 és 11 jelű kísérlettel a 10, 18 és 30 °C-os tárolási hőmérséklet hatását vizsgáltuk. A 42 °C-os tárolási hőmérséklettel a nagytömegű betonban kialakuló hőmérsékletet modelleztük.



21.2. ábra. A kísérlet során felhasznált adalékanyagok szemmegoszlási görbéi

21.11. táblázat. A kísérleti betonok összetétele

Beton jele	Cement kg/m³		Adalékanyag jele	Plastoxol % (a cementre)	Lentan A % (a cementre)	Tárolási hőmérséklet °C	A beton jele
1	315 (300)	0,50	1	0,4	3	20–22	B
2	315 (300)	0,50	1	0,4	3	42	B
3	288 (285)	0,60	5	0,4	3	42	B
4	315 (320)	0,62	3	0,4	–	42	NB
5	320 (320)	0,66	3	0,4	–	20–22	NB
6	320 (320)	0,62	4	0,4	3	20–22	NB
7	300 (294)	0,60	5	0,4	–	20–22	B
8	300 (316)	0,60	5	–	–	20–22	B
9	320 (318)	0,65	1	–	–	20–22	NB
10	300 (296)	0,60	5	0,4	–	18 °C 30 °C	B
11	300 (296)	0,60	5	0,4	–	10 °C 18 °C	B

21.5.1.2. A kísérlet során vizsgált anyagjellemzők

A kísérlet során a következő betontulajdonságokat határoztuk meg:

A *friss beton testsűrűségét,* valamint a testsűrűséget a kizsaluzás időpontjában és a vizsgálatkor.

A *beton konzisztenciáját* roskadásmérő kúppal, terülésvizsgáló készülékkel és Glanwille készülékkel MSZ 4714 szerint (*21.12. táblázat*).

21.12. táblázat. A friss beton tulajdonságai

Beton jele	Konzisztencia-mérőszámok			Testsűrűség, kg/lit.		
	roskadás cm	terülés cm	tömörödési szám	12×12×36 cm-es hasábon	12×12 cm keresztmetszetű piskótán	7,07×7,07×25 cm-es hasábon
1	16	42×41	0,96	2,345	2,355	2,365
2	17	38×41	0,9	2,33	2,34	2,41
3	6,5	38×38	0,89	2,33	2,34	2,335
4	6	38×43	0,975	3,87	3,92	3,92
5	6	40×40	0,96	3,93	–	3,99
6	4	40×43	0,955	3,94	3,995	3,95
7	19	46,5×47	0,95	2,355	–	2,335
8	3	41,5×40	0,9	2,33	–	2,39
9	5	41×41	0,92	3,91	–	
10	17,5	43×44	0,96	–	–	2,55
11	17	43×40	0,94	–	–	2,36

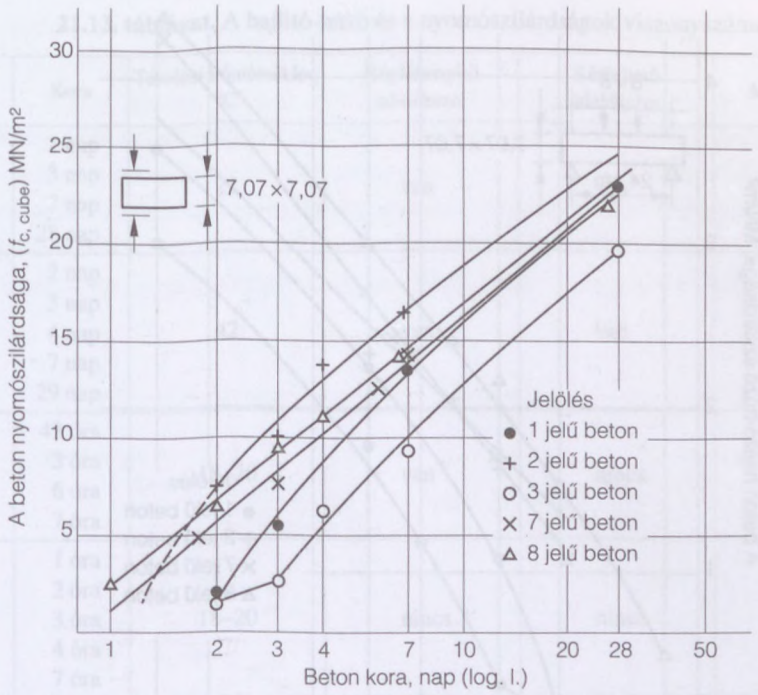
A beton *hajlító-húzó szilárdságát* 7,07×7,07×25 cm méretű próbatesteken, 24 cm támaszközön, harmadpontos terheléssel. A beton *nyomószilárdságát* (testszilárdságát) ugyanezen próbatestek eltört darabjain, 50 cm^2 felületű acél nyomólapok között. A nyomószilárdságot a beton kora függvényében a *21.3. ábra,* a hajlító-húzószilárdságot a *21.4. ábrán* szemléltettük.

A beton hasábszilárdságát, feszültség- alakváltozási diagramját és rugalmassági modulusát 12×12×36 cm méretű hasábokon határoztuk meg.

A beton *húzószilárdságát és húzási rugalmassági modulusát* 12×12 cm^2 keresztmetszetű, piskóta alakú próbatesteken.

A próbatesteket 24 órás korú kiformázásuk után vízben tároltuk, mivel a megépített szerkezeten a jól záró zsaluzatból a kizsaluzásig víz nem távozhat el.

A beton alakváltozásának a vizsgálata során meghatároztuk a beton erőirányú és arra merőleges alakváltozását. A *feszültségnyúlási-,* illetve összenyomódási *diagramokat* 40 mm alaphosszú, a hasáb két átellenes oldalának felezőjére elhelyezett, Hottinger D 32 típusú indukciós nyúlásmérő és mérőerősítő híd felhasználásával, X-Y-Y' koordinátaíró segítségével fel is rajzoltattuk.



21.3. ábra. A kvarcadalékanyagos (B jelű) beton nyomószilárdságának időbeni alakulása

A fiatalkorú beton hővezetési tényezőjét ugyan a hagyományos módon, Bock-készülékben, állandósult hőáramban is meghatároztuk, de ezt nem tartottuk kielégítőnek. Ugyanis a vizsgálat több órát vett igénybe, ami alatt a beton hőállapota a keletkező hidratációhő miatt nem állandó, de megindul a páravándorlás is, amely szintén befolyásolja a mérés eredményét. Ezért olyan, nem stacionárius mérési módot alkalmaztunk, amelynél a mérés tartama 30 s. A mérés leírását a Tudományos Közlemények 27. kötete tartalmazza.

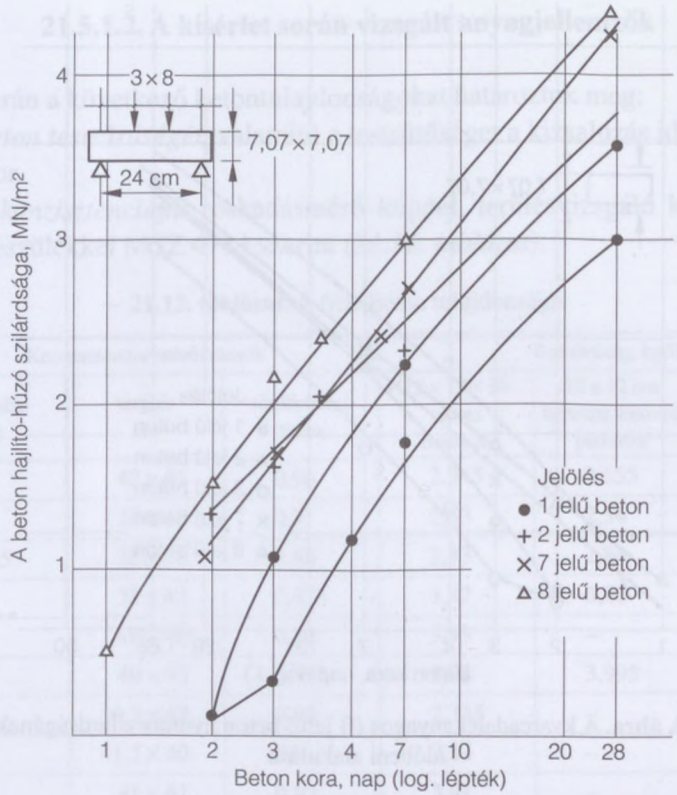
A zsaluzóanyag és a védelmül feltételezett műanyaghab hővezetési tényezőjét Bock-készülékben határoztuk meg.

21.5.1.3. A kísérletből levont következtetések Számításba vett anyagjellemzők

A *friss beton* tulajdonságait a *21.12. táblázatban* foglaltuk össze.

a) Kötött testsűrűségű betonok szilárdsági és alakváltozási jellemzői.

Az adalékszereknek a beton szilárdulási folyamatára gyakorolt hatását szemlélteti a *21.3. és 21.4. ábra.*



21.4. ábra. A kvarcadalékanyagos (B jelű) beton hajlító-húzó szilárdságának időbeni alakulása

Az 1 és 7 jelű beton lényegében annyiban tér el egymástól, hogy a 7 jelű betonhoz csak képlékenyítőt, az 1 jelűhöz képlékenyítőt és kötéskésleltetőt is adagoltunk. A tárolási hőmérséklet 20–22 °C volt.

Ennek megfelelően lényegesen eltér a kezdeti nyomószilárdságuk és még inkább eltér a kezdeti húzószilárdságuk. Az 1. jelű betonnak 2 napos koráig gyakorlatilag nem volt húzószilárdsága. A két beton közötti szilárdságkülönbség a későbbiekben fokozatosan csökkent.

A 8. jelű beton egyáltalán nem tartalmazott adalékszert. A konzisztenciája eltért az 1 és 7 jelű betonétól. Ebből adódott a 7 jelű betonénál nagyobb szilárdsága. Ezzel szemben, ha az 1 jelű betont nem szobahőmérsékleten, hanem kb. 42 °C hőmérsékleten tároltuk (2 jelű beton), akkor a késleltető hatása már kevésbé érvényesült és 24 órás korban is volt kis szilárdsága.

A hajlító-húzó és nyomószilárdságok viszonyszámait a *21.13. táblázatban* foglaltuk össze. A táblázat adatai szerint a hajlító-húzó és a nyomószilárdság viszonyszámát az adalékszerek is befolyásolják. Éspedig a képlékenyítő és késleltető adalékszert tartalmazó betonoké (1–3 jelű) kisebb volt, mint a csak képlékenyítőt tartalmazó, vagy vegyszer nélküli betonoké (7 és 8 jelű). Külö-

21.13. táblázat. A hajlító-húzó és a nyomószilárdságok viszonyszámai

Beton jele	Kora	Tárolási hőmérséklet, °C	Képlékenyítő adalékszer	Késleltető adalékszer	A viszonyszám
1	2 nap 3 nap 7 nap 28 nap	21	van	van	0,073 0,198 0,168 0,157
2	2 nap 3 nap 4 nap 7 nap 29 nap	42	van	van	0,177 0,160 0,149 0,144 0,156
7	43 óra 3 óra 6 óra 7 óra	18–20	van	nincs	0,233 0,160 0,196 0,195
8	1 óra 2 óra 3 óra 4 óra 7 óra	18–20	nincs	nincs	0,200 0,236 0,220 0,219 0,218

nösen kicsi volt a kétféle adalékszert tartalmazó, kb. 20 °C hőmérsékleten tárolt betonok 2 napos szilárdságainak a viszonyszáma (1 és 3 jelű). Ez azt mutatja, hogy a kezdeti húzószilárdság ebben az esetben lassabban alakul ki a nyomószilárdságnál, amitől viszont a rugalmassági modulus függ.

1. Ha a beton csak képlékenyítőt tartalmazott, kötéskésleltetőt nem, akkor a tárolási hőmérséklet hatására a *21.5. és 21.6. ábrák* szerinti eredményt kaptuk. A $7{,}07 \times 7{,}07 \times 25$ cm méretű hasábokon megállapított nyomószilárdság (*testszilárdság*) és a $12 \times 12 \times 36$ cm méretű hasábokon meghatározott nyomószilárdság (hasáb- vagy prizmaszilárdság) között lineáris összefüggés áll fenn (*21.7. ábra*). A hasábszilárdság a testszilárdságból jó közelítéssel számítható

$$f_{c,\,pr} = 0{,}72 f_c$$

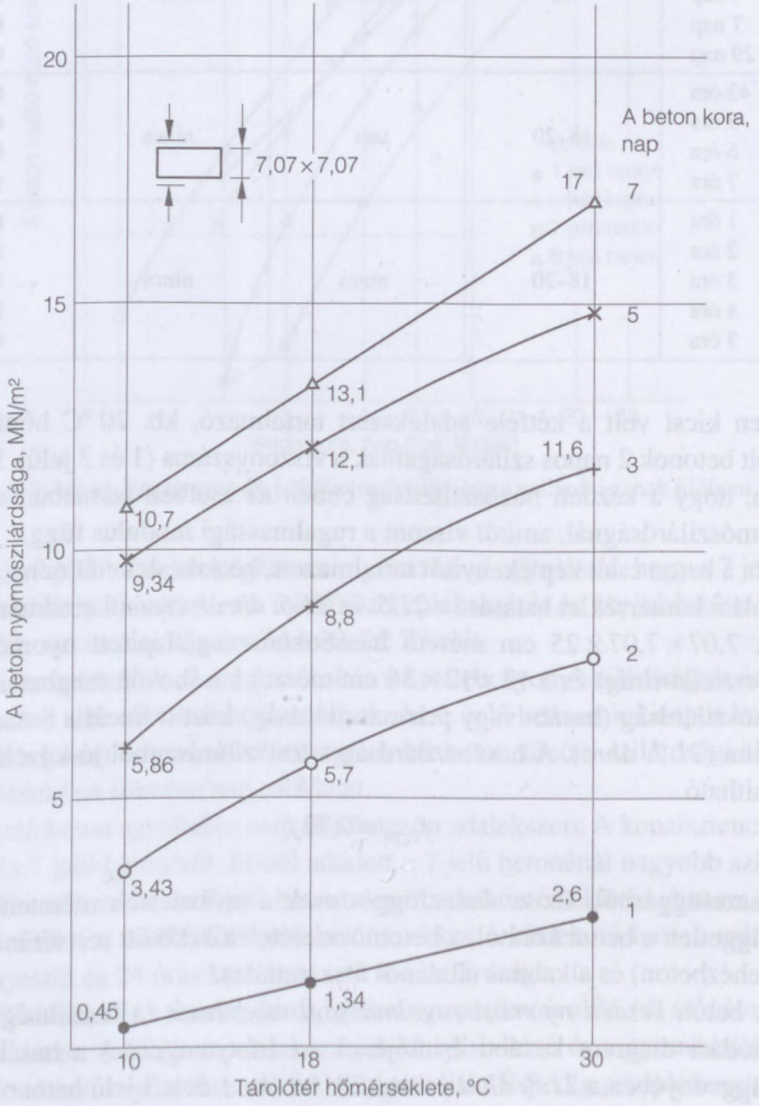
összefüggésből. Ez az összefüggés csak a próbatestek méreteitől függ és független a beton korától, a beton összetételétől (kötött testsűrűségű, illetve nehézbeton) és alkalmas általános átszámításra.

A beton *kezdeti nyomási rugalmassági modulusát* (a feszültség-összenyomódási diagram kezdeti érintőjének az iránytangense) a hasábszilárdság függvényében a *21.8. ábrán* tüntettük fel. Az 1 és a 3 jelű betonok jól követik a Roš-képlet szerinti összefüggést, nevezetesen

$$E_{o,c} = 60\,000 \frac{f_{c,pr}}{f_{c,pr} + 15}$$

(mindent MPa-ban kell érteni). Ezt az összefüggést használhatjuk további számításainkban.

A hőmérsékleti feszültségek számításához a *kezdeti húzási rugalmassági modulusra* van szükségünk. Ezt nagyon nehéz meghatározni. Kísérleti eredményeink is eléggé szórnak. Ezért az összefüggés megállapításához figye-



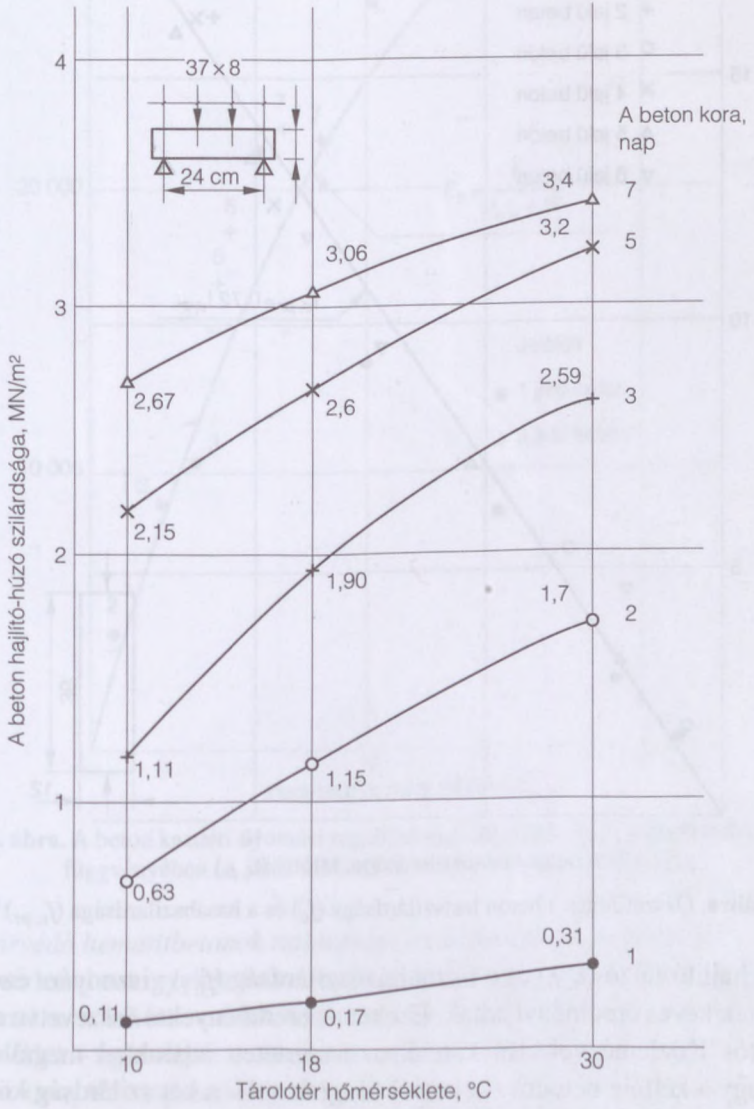
21.5. ábra. A kvarcadalékanyagos beton (B jelű) nyomószilárdsága a betonhőmérséklete függvényében

lembe vettük azt a gondos, nagyszámú kísérletsorozatot is, amelyben ezt vizsgáltuk [*Balázs–Borján* (1974)].

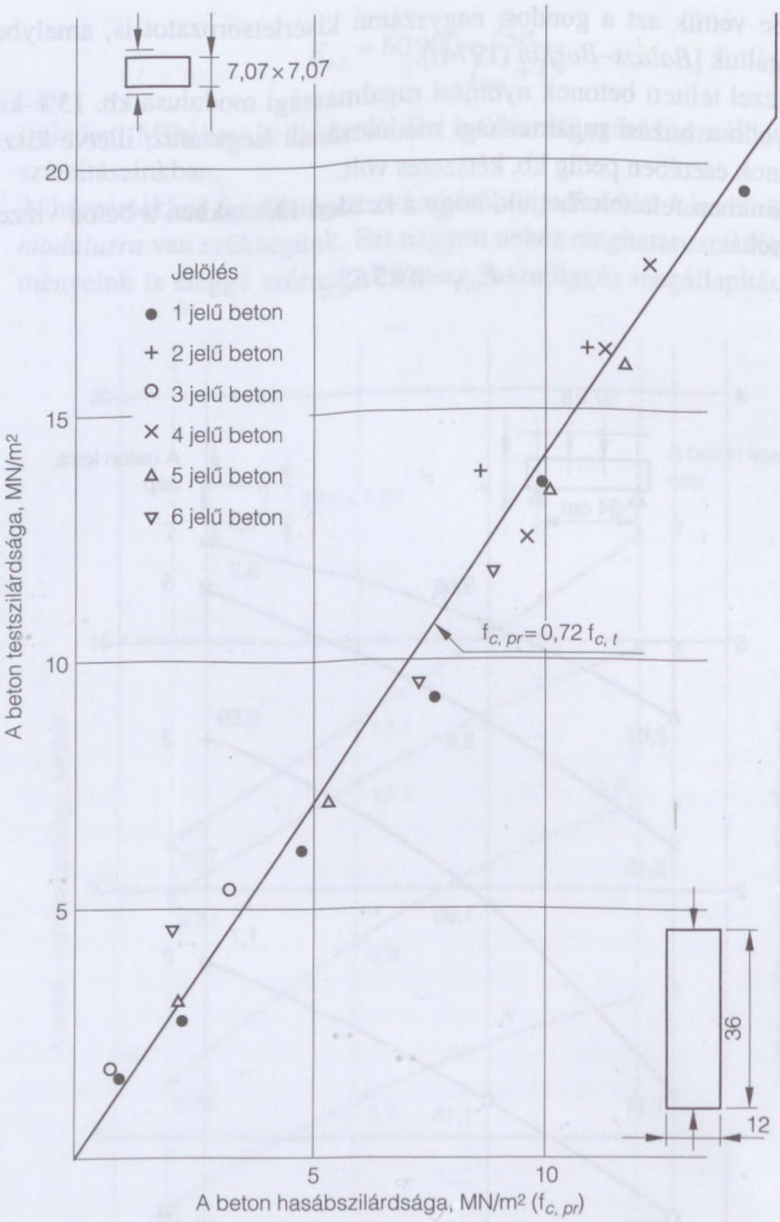
A vízzel telített betonok nyomási rugalmassági modulusa kb. 15%-kal volt nagyobb a húzási rugalmassági modulusánál. Légszáraz, illetve kiszárított betonok esetében pedig kb. kétszeres volt.

Esetünkben feltételezhetjük, hogy a kezdeti időszakban a beton vízzel telített, tehát

$$E_{o,t} = 0{,}85\,E_{o,c}$$

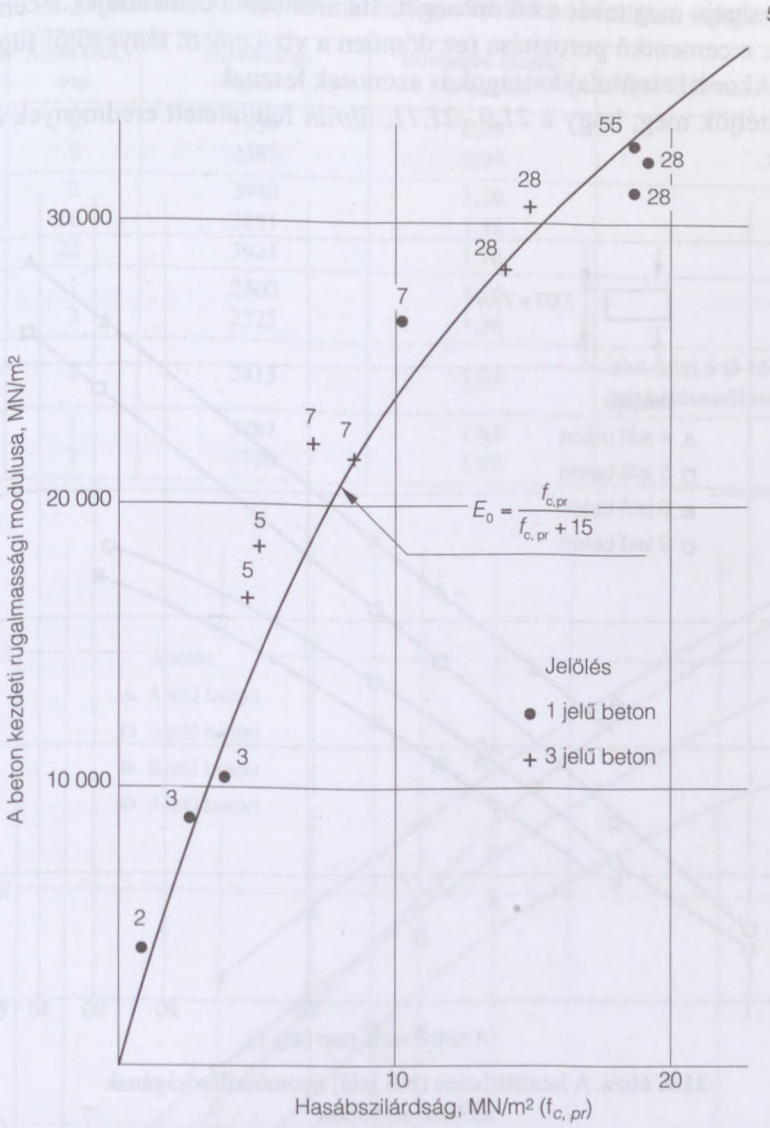


21.6. ábra. A kvarcadalékanyagos beton (B jelű) hajlító-húzó szilárdsága a beton hőmérséklete függvényében



21.7. ábra. Összefüggés a beton testszilárdsága (f_c) és a hasábszilárdsága ($f_{c,pr}$) között

2. A hajlító-húzó ($f_{t,fl}$) és a tiszta húzószilárdság ($f_{t,t}$) viszonyára ezek a kísérletek kevés eredményt adtak. Ezeket az eredményeket összevetve a Tudományos Közlemények 16. kötetében ismertetett adatokkal megállapíthatjuk, hogy a kétféle betonra – a kortól függetlenül – a két szilárdság között lineáris összefüggés áll fenn és az $f_{t,t}/f_{t,fl}$ viszonyszám jó közelítéssel 0,4 (vízzel telített betonra).



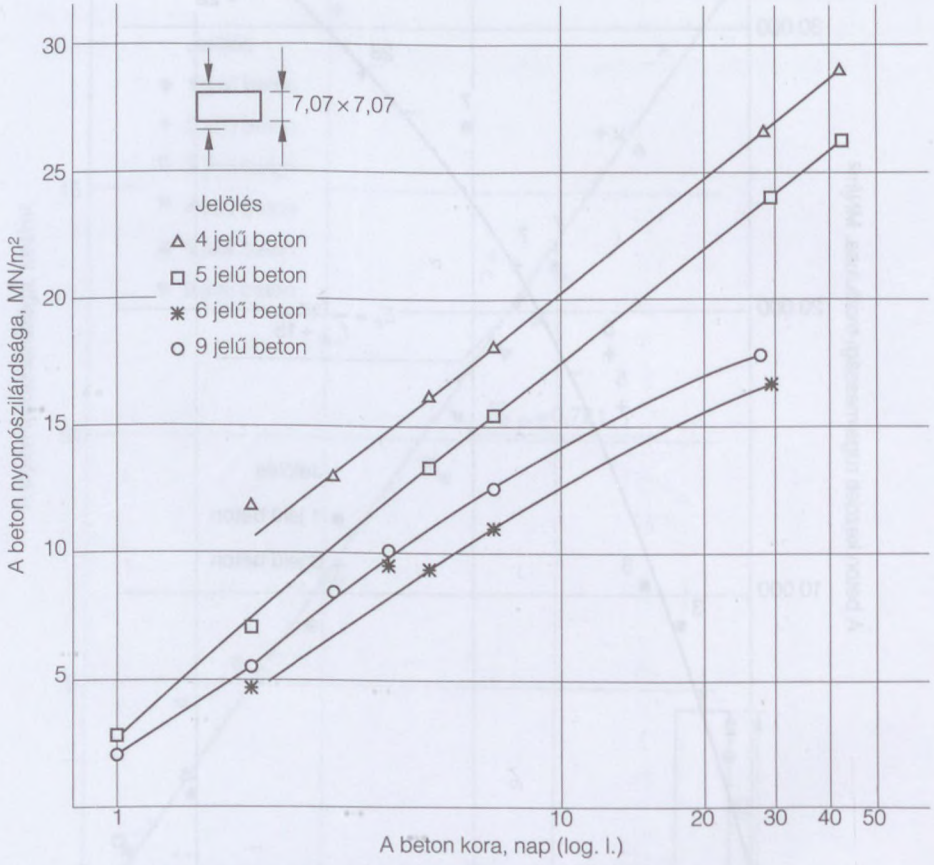
21.8. ábra. A beton kezdeti nyomási rugalmassági modulusa (E_0) a hasábszilárdság függvényében (A jelek melletti számok a beton korát jelentik)

b) Sugárvédő hematitbetonok szilárdsági és alakváltozási jellemzői

A kísérlettel azt igyekeztünk megállapítani, hogy a hematitbeton tulajdonságai eltérnek-e a kötött testsűrűségű betonra megállapított törvényszerűségektől. A kísérlet – úgy véljük – alátámasztotta azt a feltételezést, hogy mindkét esetben azonos törvényszerűségeket tételezhetünk fel. Ugyanis a beton szilárdsági és alakváltozási tulajdonságai a cementkő és az adalékanyag tulajdonságaitól függnek. Az adalékanyagok a betonhoz képest nagyszilárdságúak. A cementkő

határozhatja meg tehát a különbséget. Ha azonban a cementfajta, a cementtartalom, a cementkő porozitása (ez döntően a víz-cement tényezőtől függ) azonos, akkor a betontulajdonságok is azonosak lesznek.

Úgy ítéljük meg, hogy a *21.9.–21.11. ábrán* feltüntetett eredmények ezt igazolják.



21.9. ábra. A hematitbeton (NB jelű) nyomószilárdságának időbeni alakulása

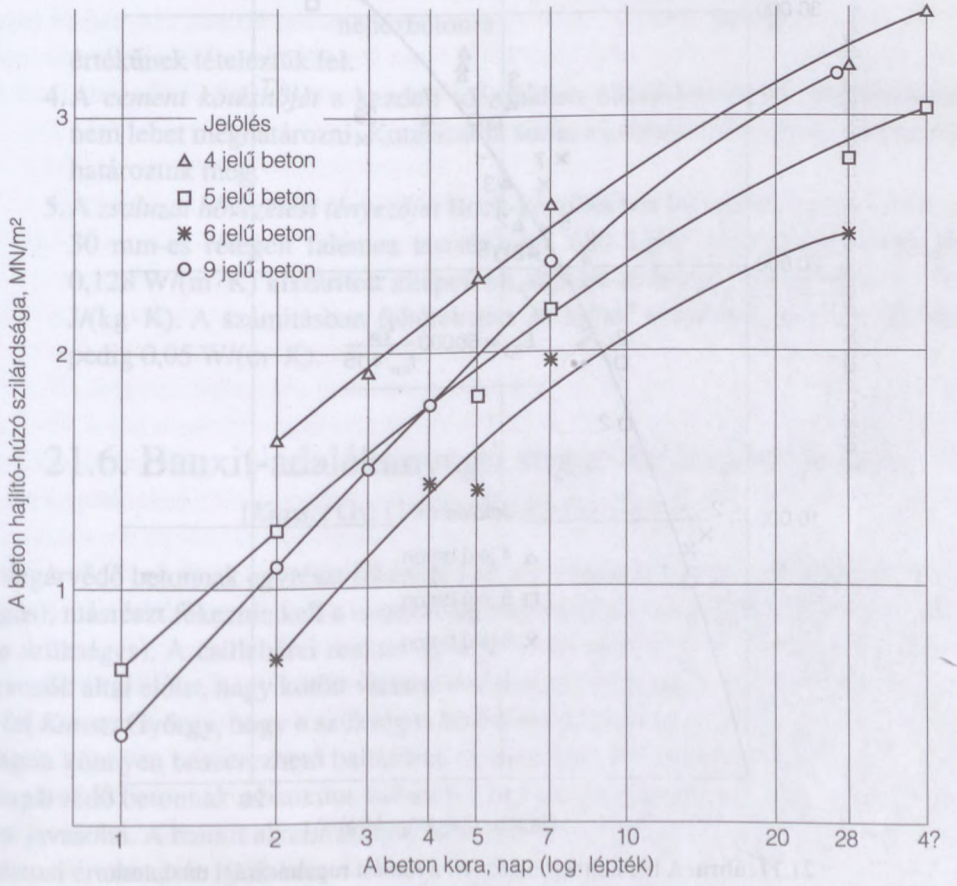
c) A beton hőtani tulajdonságai

1. Egyrészt ellenőriztük a kötött testsűrűségű *beton hővezetési tényezőjét nem állandósult hőáramban* és a betonozást követő 30–50 órában 3, 6, illetve 3,2 W/(m · K) értéket kaptunk. Másrészt a hematitbetonra ugyanebben az időtartamban 6,3–5,6 2 W/(m · K) közötti értékeket mértünk. A mérési módszert a Tudományos Közlemények 25. kötetében ismertettük [*Balázs–Tóth–Liptay–Zimonyi* (1981)].

A beton hővezetési tényezőjét Bock-készüléken vizsgálva a *21.14. táblázatban* feltüntetett eredményeket kaptuk.

21.14. táblázat. A beton hővezetési tényezője Bock-készüléken vizsgálva

Beton jele	Beton kora, nap	Testsűrűsége kg/m³	Hővezetési tényező W/(m·K)	Megjegyzés
1	8	2339	0,99	
	9	2387	0,99	
4	2	3940	1,26	
	16	3851	1,38	
	22	3924	1,76	
10	1	2360	1,36	
	2	2325	1,36	
10	2	2415	1,62	alul-felül 5 Ø 16 ponthegesztett hálóvasalással
3	1	3787	1,63	
	2	3730	1,90	

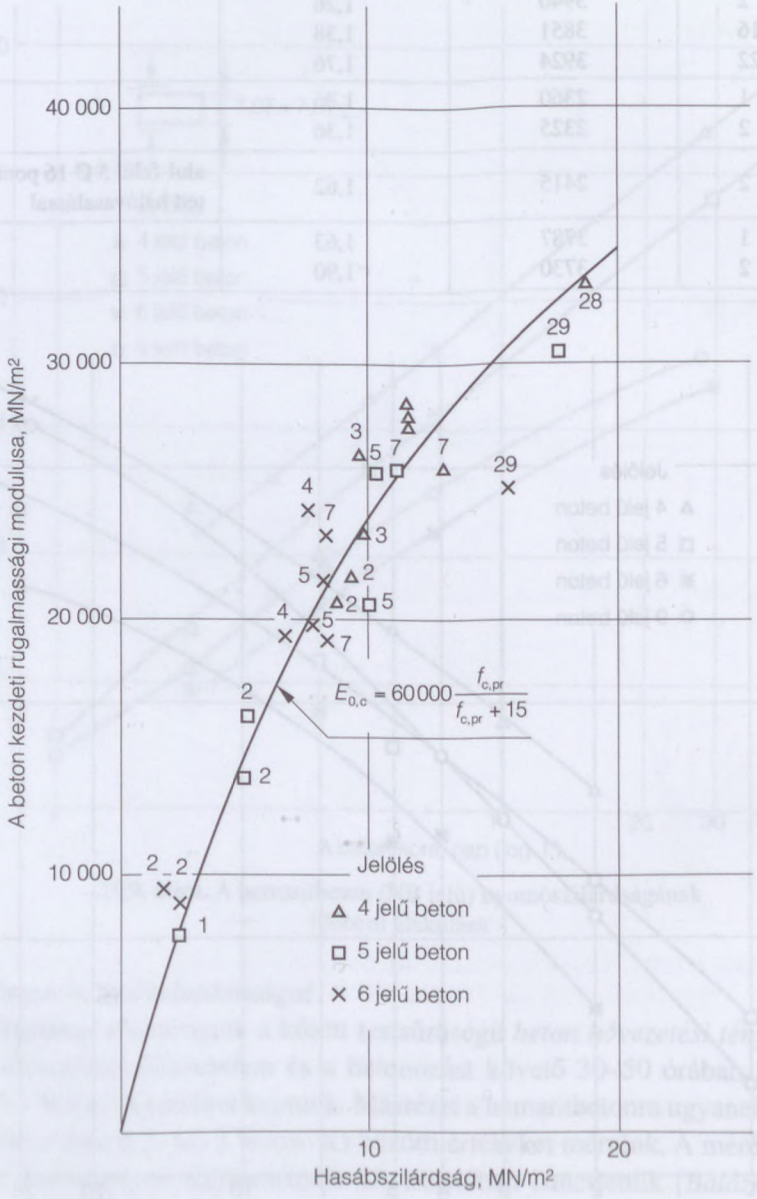


21.10. ábra. A hematitbeton (NB jelű) hajlító-húzó szilárdságának időbeni alakulása

2. A *beton fajhőjét* – irodalmi adatok alapján – a kötött testsűrűségű kvarckavicsbetonra 0,88 kJ/(kg · K)-nek vettük. A nehézbeton fajhőjét a következőképpen számítottuk

az acél fajhője: $c_a = 0{,}46$ kJ/(kg · K)

a beton fajhője: $c_b = 0{,}88$ kJ/(kg · K)



21.11. ábra. A hematitbeton kezdeti nyomási rugalmassági modulusa ($E_{o,c}$) a hasábszilárdság függvényében

A nehézbeton összetétele:

$m_a = 1850$ kg/m^3 acélgolyó (46,7%)

$m_b = 2110$ kg/m^3 beton (46,7%)

$m_{hb} = 3960$ kg/m^3

A hematitbeton (c_{hb}) fajhője az alapadatokból

$$c_{hb} = \frac{c_a m_a + c_b m_b}{m_{hb}}$$

képlettel számítható:

$$0{,}467 \cdot 0{,}46 = 0{,}215$$

$$0{,}533 \cdot 0{,}88 = 0{,}470$$

$$c_{hb} = 0{,}685 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

3. A *beton hőtágulási együtthatóját* szintén irodalmi adatok és számításaink alapján

kötött testsűrűségű betonra $10 \cdot 10^6$/ °C

nehézbetonra $11 \cdot 10^6$/ °C

értékűnek tételeztük fel.

4. A *cement kötéshőjét* a kezdeti időszakban oldáshőméréssel megbízhatóan nem lehet meghatározni. Kutatásaink során a kötéshőt termoszos módszerrel határoztuk meg.

5. A *zsaluzat hővezetési tényezőjét* Bock-készülékben határoztuk meg. A 15 és a 30 mm-es rétegelt falemez testsűrűsége 680 kg/m^3, hővezetési tényezője 0,128 W/(m · K) kiszárított állapotban, fajhője az irodalom alapján $2{,}51 \cdot 10^3$ J/(kg · K). A számításban feltételezett 30 kg/m^3 testsűrűségű műanyaghabé pedig 0,05 W/(m · K).

21.6. Bauxit-adalékanyagú sugárvédő nehézbeton

[*Kunszt* Gy. (1961), *Balázs* Gy. (2005)]

A sugárvédő betonnak egyrészt fékeznie kell a γ-sugárzást (ehhez nehézbeton szükséges), másrészt fékeznie kell a neutronsugárzást (ehhez nagy kötött víztartalmú beton szükséges). A csillebérci reaktor építése során igen nagy nehézséget okozott a tervezők által előírt, nagy kötött víztartalmú limonit beszerzése. Ezt követően ismerte fel *Kunszt* György, hogy a szükséges kötött víztartalom megtalálható a Magyarországon könnyen beszerezhető bauxitban. A bauxit testsűrűsége azonban kicsi. Ezért a sugárvédő betonnak a bauxitos habarcsot és a nehéz adalékanyagot tartalmazó betont javasolta. A bauxit alkalmasságát sokoldalúan vizsgálta. E témakörből írta kandidátusi értekezését 1962-ben.

A *Bauxitadalékanyagú sugárvédő nehézbeton* c. értekezés legfontosabb eredményei az értekezésben megfogalmazott megválaszolandó kérdések alapján a következők:

1. Sikerült a nyersbauxittal nagy hidrátvíztartalmú betont előállítani. A kísérletek és a csillebérci blokkgyártás során készített bauxit + vasadalékanyagú beton hidrátvíztartalma – azonos testsűrűséggel – mintegy kétszerese volt a hazai limonitok felhasználásával készíthető limonit + vashulladék adalékanyagú betonok hidrátvíztartalmának. A betonok hidrátvíztartalma nagyobb volt, mint amit addig a szakirodalom szerint – a külföldet is beleszámítva – sikerült elérni. 25% izzítási veszteségű bauxittal és vashulladékkal a hidrátvíztartalom következő képlettel becsülhető:

$$h = 510 - 0{,}67\rho_t$$

ahol h a hidrátvíztartalom ℓ/m^3-ben,

ρ_t a kiszárított beton testsűrűsége t/m^3-ben.

A képlet érvényességi határa 2–5 t/m^3 testsűrűség, szórás +15%.

2. A bauxithabarcs nyomószilárdsága elsősorban a víz-cement tényezőtől függ. Emellett befolyásolja a bauxit kémiai és ásványi összetétele, vízfelvétele, szétmorzsolódási tényezője stb. Alapvető a víz-cement tényező. C500 jelű cementtel és 0–5 mm-es száraz adalékanyaggal az összefüggés

$$f = 230\left(\frac{m_c}{m_w} - 0{,}25\right)$$

ahol f a habarcs 7 cm élhosszú kockán megállapított 28 napos szilárdsága

$$\frac{m_c}{m_w} = \text{cement-víz tényező}$$

Érvényességi határa $m_c/m_w = 0{,}5$-től 1,3.

Bár B280 jelű betonszilárdságot is el lehet érni, csak B140 vagy annál kisebb jelű betont érdemes betervezni, mivel a vastag falak miatt nagyobb szilárdságra nincs szükség.

A kutatás szerint a bauxitadalékanyagú nehézbeton mindegyik – a felhasználás szempontjából mértékadó – mechanikai jellemzője megfelel a gyakorlatban elterjedt nehézbetontípusok jellemzőinek.

A bauxitadalékanyagú beton zsugorodása csak akkor elfogadható, ha a beton zsugorodását viszonylag nagy mennyiségű durva adalékanyag gátolja. De erre a γ-sugárzás elleni védelem miatt is szükség van.

3. A hőtechikai jellemzők szempontjából a bauxit + hematit + vashulladék adalékanyagú beton kevésbé kedvező, mint a limonit + magnezit vagy limonit + vashulladék adalékanyagú beton, viszont kedvezőbb a barit adalékanyagú betonnál.

Ennek a reaktorok aktív zónája körül hőhatásnak kitett betonnál van jelentősége. Lehet azonban, hogy a beton repedésérzékenységére mégis kedvező a hatása, mivel kb. fele akkora a rugalmassági modulusa. Ezt még tisztázni kell.

4. A nehézbetonok homogenitására (testsűrűségük és hidrátvíztartalmuk szórására) irodalmi adat alig volt. A csillebérci reaktor limonitbetonjának egyenletességére voltak adatok. A 3,53 t/m^3 építési testsűrűségű beton testsűrűségének szórása 0,10 t/m^3, variációs együtthatója 3% volt. Ezt összehasonlították a Csillebércen legyártott bauxitadalékanyagú nehézbetonéval, és a kétféle beton homogenitását gyakorlatilag azonosnak minősítették.

A γ-abszorpciós kísérletekkel azt kapták, hogy az átlagos abszorpciós koefficienshez viszonyított eltérés a testsűrűséggel, az viszont a vashulladék mennyiségével nő.

5. A kísérletek során végzett gyorsneutron-abszorpciós mérések eredményei alapján kialakított képletekre vonatkozóan *Kunszt* György a következőket jelentette ki:

a) A végzett transzmissziós mérések eredményei összhangban vannak az amerikai *Davis* abszorpciós mérési eredményeivel.

b) Ugyancsak összhangban vannak a kb. 3MeV energiájú neutronok eltávolítási tényezőjének becslésére felállított képletek *Davis* eredményeivel.

c) A vizsgált betonok *Davis* alapján számított abszorpciós koefficiense – a kb. 3 MeV energiájú neutronok esetén – 7–16%-kal kisebb, mint a *Kunszt* képletéből számított eltávolítási tényező. A különbség kis víztartalom (30–50 ℓ/m^3) esetén nagy, nagy víztartalom (300–500 ℓ/m^3) esetén kicsi.

d) A *Kunszt* által végzett transzmissziós és a *Davis* által végzett abszorpciós mérések alapján kialakított empirikus képletek szerint – kb. 3 MeV energiájú neutronok esetén – az abszorpciós koefficiens 55–67%-kal kisebb mértékben változik a testsűrűség változásánál, mint az eltávolítási tényező. Ugyanakkor a víztartalom változása esetén az abszorpciós koefficiens változása mintegy 67%-kal nagyobb, mint az eltávolítási tényezőé.

6. Összehasonlítva a különböző betonok gyorsneutron-eltávolítási, illetve abszorpciós tényezőjét, *Kunszt* arra az eredményre jutott, hogy a legjobb eredményeket a bauxit + vashulladékos beton szolgáltatja az empirikus képletekkel számított eltávolítási tényező és az abszorpciós koefficiens szempontjából egyaránt. A kavicsbetonnál jobb eredményeket ad a bauxit + színesfémsalak keverék is.

7. *Kunszt* György végül vizsgálta a nehézbeton gazdaságosságát is. Mivel a hasonló típusú keverékek árát elsősorban az adagolt vashulladék mennyisége szabja meg, a bauxit + vashulladékos beton általában többe kerül, mint az azonos testsűrűségű limonitbeton. A többletköltséget azonban csökkenti az a körülmény, hogy a bauxit olcsóbb, mint a limonit és mivel a bauxit puhább kőzet a limonitnál, tehát olcsóbban finomítható. Ezenkívül a bauxitnak nagyobb a hidrátvíztartalma, tehát kisebb betonvastagság elég a neutronsugárzás fékezéséhez. Lényeges árkülönbség tehát nincs köztük.

A bauxitadalékanyagú nehézbeton szabadalmat kapott, és gyakorlati alkalmazására is sor került.

22. A téli jégtelenítő sózás hatása az acélbetét korróziójára

22.1. Az acélbetét korróziója károsító anyagok betonba hatolása nélkül

[*Balázs–Erdélyi–Kovács* (1991)]

22.1.1. Bevezetés

Az USA-ban az évente előállított fémek kb. 40%-át a korrodált fémek pótlására használják [*Brown–Kessler*]. Hazánkban is hasonló a helyzet.

Ha az acélt védelem nélkül szabadban tároljuk, akkor az hamarosan rozsdásodik, mivel visszaalakul a termodinamikailag alacsonyabb energiaszintű vasoxid formába, amelyből nagy energiafelhasználással előállítottuk.

A vasbeton szerkezetek csodálatos pályafutásukat nagyrészt annak köszönhették, hogy a cement szilárdulása során felszabaduló, a cement tömegére vonatkoztatott 15–18% $Ca(OH)_2$ (mészhhidrát) nagy lúgossága passzíválja a betonacél felületét azáltal, hogy a betonba ágyazott acél felületén egy folytonos áthatolhatatlan, mindössze 10^{-6} mm vastag oxid védőréteget hoz létre, amely a betont megvédi a korróziótól. Ahhoz, hogy ez bekövetkezhessék, biztosítani kell a minimális cementtartalmat. Általában a hidak szerkezeti betonját 270–400 kg/m^3 cementtel készítik.

A gyakorlati tapasztalat szerint a vasbeton – korrózióvédelmi szempontból – beváltotta a hozzá fűzött reményeket. Bár terhelés hatására megreped, de ha a betonfedés vízés gázzárósága jó, és a betonfedés vastagsága megfelelő, akkor nem lép fel korrózió.

Mielőtt a betonacél korrózióját tárgyalnánk, foglaljuk össze a korrózió elvi alapjait.

22.1.2. A korrózió elvi alapjai

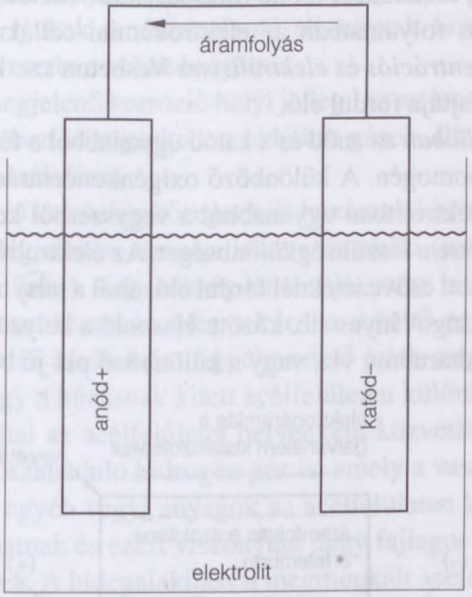
[*Brown–Kessler–Hartl* (1984)]

A korróziós folyamat lehet *száraz,* amely cseppfolyós fázis hiányában, vagy a környezet harmatpontja feletti hőmérsékleten fordul elő; továbbá lehet nedves, amelyben a fém gőzökkel, *nedves* gázokkal, vizes oldatokkal vagy elektrolitokkal érintkezik. Az utóbbi okozza a fémek legnagyobb mérvű romlását. A vasbetonban a nedves korrózió lép fel.

A fémkorrózió egyik alapvető jellemzője, hogy hatására a fémes jelleg megszűnik. Ez úgy következik be, hogy a fémes rácsból fémion és elektron lép ki. A fémion és az elektronkilépés egymáshoz való viszonya szerint kémiai és elektrokémiai korróziót különböztetünk meg.

A *kémiai korrózió* során a fémion- és az elektronkilépés térbelileg nem elválasztható, 0,4 nm távolságon belül következik be (pl. revésedésre, oxidáló gázok hatására, karbonátosodási korrózió). *Az elektrokémiai folyamat* során a korrózió két részfolyamatra, fémion- és elektronkilépésre bomlik, egymástól 0,4 nm-nél nagyobb távolságban, elektrolit (pl. víz) jelenlétében. Az elemi reakciófolyamatot térbelileg elemi cellákként kezelhetjük.

Az elektrokémiai korróziós celláknak négy alapkomponense van. Az elektrolit, az anód, a katód és az elektródokat összekötő vezető (*22.1. ábra*). Az anód (+ elektróda) érintkezik az elektrolittal, amely áramvezető közeg, mint például víz vagy a talaj.



22.1. ábra. Egy korróziós cella alapelemei [*Brown–Kessler*]

A korrózió anyagvesztéssel és szilárdságcsökkenéssel járó folyamata az anódon megy végbe, amely az ionok képződését és elektronok szabaddá válását jelenti. A katód (-elektróda) szintén érintkezik az elektrolittal, de ez a fémen nem jelent korróziós helyet, mert redukciós reakció révén az anódból szabaddá váló elektronokat a vezető közvetítésével felveszi, és az elektrolittal érintkező felületen az elektrolit pozitív ionját töltés nélküli állapotúvá redukálja (fémkiválás vagy hidrogéngáz-fejlődés).

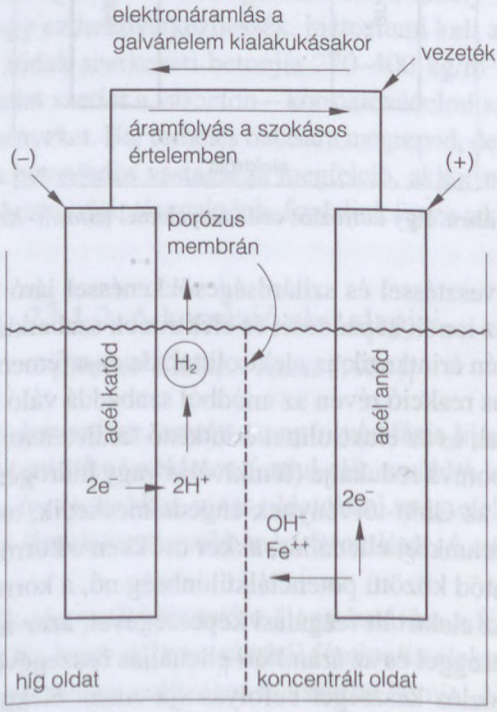
A korróziós cella az Ohm-törvénynek engedelmeskedik, ami esetünkben azt jelenti, hogy ha nő az áramköri ellenállás, akkor csökken a korróziós veszteség, ha viszont az anód és a katód közötti potenciálkülönbség nő, a korróziós veszteség is nő. A korrózió arányos az elektrolit reagálási képességével, azaz az anód és a katód közötti potenciálkülönbséggel és az áramköri ellenállás összegével.

Az elektrolit korróziós készségét befolyásolja ennek elektrolitos disszociációja, ellenállása, a pH és a hőmérséklet. Az elektrolit ún. másodrendű vezető, ahol az elekt-

romos áramlás az ionok mozgékonyságától függ. Az anódon egy elektron hiánya egy pozitívan töltött iont hoz létre, míg az addíciója a katódon egy negatívan töltött iont. Ionok keletkeznek az elektrolitos disszociáció útján, azaz egy vegyület vizes oldódása útján is. Az elektrolit fajlagos ellenállásán az ionjainak mozgékonyságából származó töltéshordozó képességét értjük. Kis fajlagos ellenállás esetén az elektrolit jó vezető, míg nagy ellenállás esetén rossz vezető. A harmadik korróziós befolyásoló tényező az oldat savasságának vagy lúgosságának a foka, azaz a hidrogénionok relatív mennyisége a rendszerben, amelynek kifejezője a pH-érték. A hőmérséklet szerepe abban nyilvánul meg, hogy a hőmérséklet növekedésével az elektrolit fajlagos ellenállása csökken, míg csökkenésével nő (másodrendű vezetők).

A nedves korróziós folyamatban az elektrokémiai celláknak három alaptípusa van: *galvanikus, koncentrációs* és *elektrolizises* Vasbeton szerkezetekben a koncentrációs cella speciális fajtája fordul elő.

A *koncentrációs cellában* az anód és a katód ugyanabból a fémből van (*22.2. ábra*), de az elektrolit nem homogén. A különböző oxigénkoncentrációk különböző típusú vegyszerek vagy az elektrolitban ugyanabból a vegyszerből keletkező koncentrációkülönbségek hozzák létre a feszültségkülönbséget. Az elektrolitban lévő feszültségkülönbség a földbe temetett csővezetéknél fordul elő, ahol a talaj minősége változik nedves, száraz, homokos, ingoványos stb. között. Hasonló a helyzet a vasbetonszerkezetben a különböző kloridtartalmú víz, vagy a különböző pH-jú betonrészek között.



22.2. ábra. Koncentrációs cella alapelemei [*Brown–Kessler*]

A nedves korrózió megjelenési formái vasbeton szerkezetben. A koncentrációs elemek alapján létrejövő korróziós hatás többféle lehet.

Az *egyenletes korrózió* oka olyan kémiai vagy elektrokémiai hatás, amely egyenletesen hat az acél felületén. Homogén mikroszerkezetű fémeken fordul elő [*Cocks* (1973)].

A pitting vagy lyukkorrózió. A szélsőségesen lokalizálódott korróziós támadás olyan lyukakat hoz létre, amelyeknek az átmérője kisebb, mint mélységük. Ez a legdestruktívabb korrózió, mivel átlyukadásos tönkremenetelt hoz létre, miközben a fém tömegvesztesége csak néhány százalék. A lyukban anódos korrózió játszódik le. A lyukkorróziót megindíthatják metallurgiai inhomogenitások a fémben, vagy sóoldatok a betonban. A lyukak rendszertelenül elosztottak és eltérő mélységűek. Az élettartamot ebben az esetben nehéz becsülni.

A repedésekben megjelenő korrózió helyi jellegű és az ionok különböző koncentrációi, vagy a repedésben elhelyezkedett oldódott gázok, illetve az itt rekedt oldott agresszív anyagok hozzák létre.

A *feszültségkorrózió* korróziós közegnek és húzásnak kitett fémekben, feszítő huzalokban jön létre. Megjelenési formája lehet szövetközi (interkrisztallinos), illetve átmenő (transzkrisztallinos). A feszültség lehet saját, vagy külső feszültség.

Nagyobb a szövetszerkezeti elemen a kár, ha a kettő együtt van, mintha csak egyik hat. Ez a korrózió rendszerint figyelmeztető jelek megjelenése nélkül megy végbe. Az oka az, hogy a húzásnak kitett acélfelületen különbözőképpen reped át a passzív réteg, és ezáltal az acélfelületet helyenként közvetlenül érik a vegyi hatások, így a katódon felszabaduló hidrogén gáz is, amely a vasanyagba beoldódik, és azt rideggé teszi. Az egyéb vegyi anyagok az acélfelületen keletkező apró repedésekben közvetlenül hatnak és ezért viszonylag nagy fajlagos felületen alakulnak ki a koncentrációs elemek. A hidegalakítással megmunkált acélok (feszítőhuzalok) érzékenysége nő a feszültségkorróziós hatással szemben, a melegen hengereltekéhez képest. Példák erre a hegesztési varratot körülvevő helyek, továbbá a feszített beton huzaljai.

Az ún. *korróziós kifáradás* valószínűleg a feszültségi korrózió nagymérvű kiterjedése folytán lép fel. Ilyenkor a fáradási szilárdság csökken, ugyanakkor más külső megjelenése nincs.

A fém korróziós sebességét meggyorsíthatja az agresszív, illetve biológiailag aktív környezet. Ilyen környezeti tényezők a biológiai korrózió, a kóboráram és a környezeti különbségek.

A *biológiai korrózió* másodlagos korróziótípus. Az élő organizmusok (algák, baktériumok) fokozhatják a korróziós folyamatot anódos és katódos reakciók és felületi passziváló rétegek elbontása által. A vas és acél korrózióját elsősorban anaerobos organizmusok okozzák.

A *kóboráramok* olyan elektrolízises korróziótípust okoznak, ahol külső áramforrásokból származó egyenáramok hatnak a fémfelületen. Ahol a kóboráram belép a

fémfelületbe, az egész katóddá válik, míg a kisülés helye, ahol a korrózió létrejön, lesz az anód. Kóbor egyenáramok léphetnek fel villamosvasúti lemezaljakban, hidakhoz alkalmazott katódos védelmi rendszerekben.

22.1.3. Acélbetét korróziója

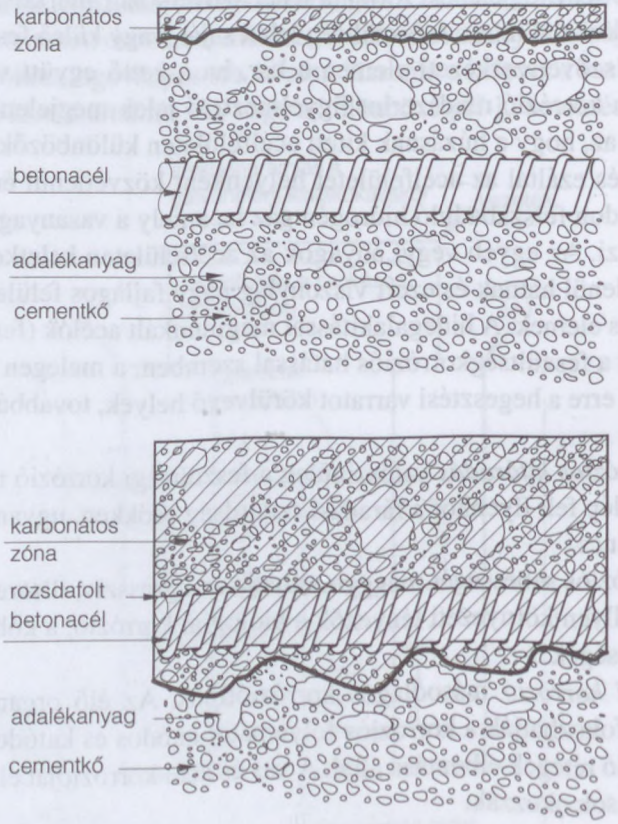
22.1.3.1. A korrózió mechanizmusa

Ebben a fejezetben azt tárgyaljuk, hogy természetes környezetben (sózás, különleges légszennyeződés nélkül) mik a korrózió feltételei.

A vasbeton szerkezetben a környezeti különbözőségek általában koncentrációs cellákat hoznak létre.

Az acélbetét felületén a korrózióvédelmet nyújtó passzív réteg megszűnhet:

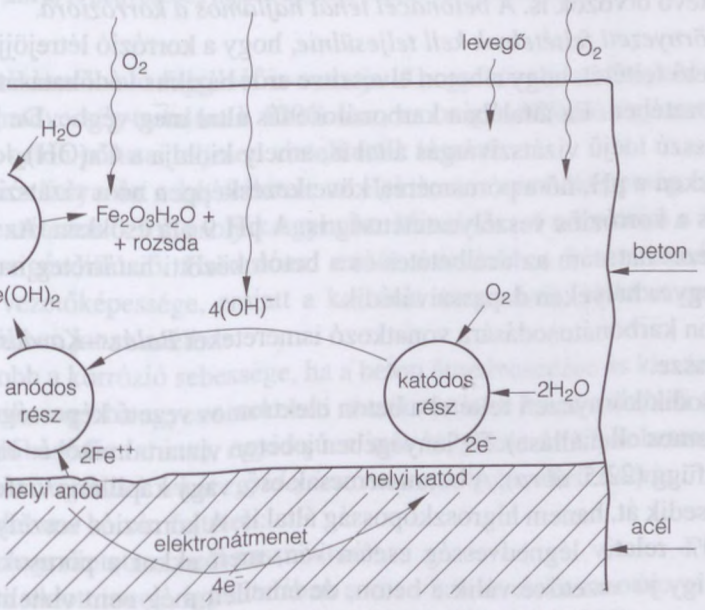
– A beton karbonátosodása által az acélbetét környezetében. Ezt nevezzük karbonátosodási vagy általában atmoszférikus korróziónak (*22.3. ábra*).



22.3. ábra. Rozsdásodás karbonátosodás miatt; a) a karbonátosodás kezdeti állapotban; b) a karbonátosodás elérte az acélbetétet

– Az acélbetét környezetében lévő kloridionok által. Ezt kloridkorróziónak nevezzük.
– A levegőben lévő (elsősorban kénvegyületek és nitrogén-oxidok) szennyező anyagok vagy egyéb szennyező anyagok által.

A korróziós folyamat mechanizmusát – Hartl (1984) nyomán – a *22.4. ábrán* szemléltetjük. A korrózió két lépésben, a betonacél két, térben elválasztott helyén, az anód- és a katódfelületen megy végbe, amelyek egy lokálelemet (helyi elemet) képeznek. A korrózióhoz a két pólust elektromosan vezetőképes betonnak (elektrolit) kell összekötnie és fémesen is kapcsolatban kell lenniük. Utóbbi a betonacél által adva van (*22.4. ábra* szerinti vezető). Ezenkívül a katódnál elegendő mennyiségű oxigénnek és víznek is lennie kell. Az anód és a katód között feszültségkülönbség van. Az anódnál vasionok mennek az oldatba, és egyidejűen elektronok szabadulnak fel, amelyek az acél közvetítésével a katódhoz vándorolnak, és ott az oxigénnel és vízzel hidroxilionokat $(OH)^-$ képeznek.



22.4 ábra. A korróziós folyamat [*Hartl* (1984)]

Az anódos részfolyamat:

$$Fe \rightarrow 2e^- + Fe^{++}$$

A katódos részfolyamat:

$$FeO(H_2O)_x$$

$$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \leftrightarrow 2(OH)^-.$$

A két részfolyamatnak egyidejűen kell végbemennie, mert a korrózió különben leáll. Eközben a katódos terület lúgossá válik, ami az acélfelületet passziválja. A vasionok és a hidroxilionok egymás felé vándorolnak és vegyülnek, ebből lesz a rozsda a következők szerint oxigénfelvétellel:

$$nFeO(H_2O)x + mO_2 \rightarrow vas(III))oxid - hidrátok = (rozsda) + pH_2O.$$

22.1.3.2. A korrózió feltételei

Az eddigieket figyelembe véve az acélbetét korróziójának két lényeges feltétele van:
– korózióra hajlamos anyag,
– a megfelelő környezet.

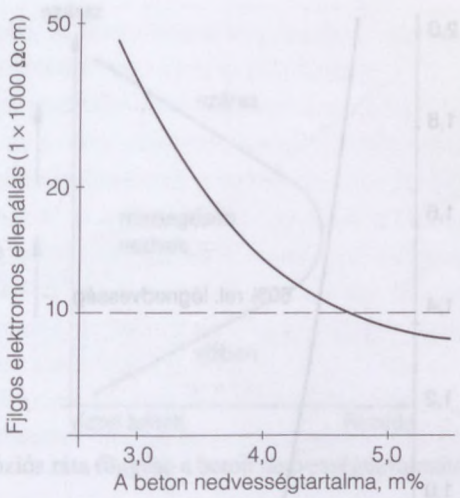
A betonacél tisztán mechanikai követelményeknek megfelelő tömegacél, hiányzik belőle a metallurgikus tisztaság, valamint hiányoznak az acélt elektrokémiailag nemesebbé tevő ötvözők is. *A betonacél tehát hajlamos a korrózióra.*

Három környezeti feltételnek kell teljesülnie, hogy a korrózió létrejöjjön:

a) Alapvető feltétel, hogy a beton elveszítse erős bázikus védőhatását a betonacél környezetében. Ez általában karbonátosodás által meg végbe. De bekövetkezhet hosszú idejű vízátszivárgás által is, amely kioldja a $Ca(OH)_2$-ot, és ezáltal is csökken a pH, nő a pórusméret, következésképpen nő a vízátszivárgás mértéke és a korróziós veszélyeztetettség is. A pH 9 alá csökken. Az így létrejött környezet hatására az acélbetétes és a beton közötti határréteg nagy felületen vagy egyes helyeken depasszíválódik.
A beton karbonátosodására vonatkozó ismereteket *Balázs–Kovács* (1990) foglalta össze.

b) A második környezeti feltétel a beton elektromos vezető képessége (illetve kis elektromos ellenállása). Ez lényegében a beton víztartalmától és ionkoncentrációját függ (*22.5. ábra*). A beton nemcsak eső, vagy kapilláris vízfelszívás által nedvesedik át, hanem higroszkóposság által is. A korróziós veszély maximuma 70–80% relatív légnedvesség esetén van, mert ekkor a pórusok víztartalma nagy, így jó vezetővé válik a beton, de emellett még nem víztelített, tehát az oxigén az acélfelülethez diffundálhat. A betonfedés vastagsága annyiban befolyásolja a beton elektromos ellenállását, amennyiben a betonfedés mentén nem egyforma a nedvességtartalom. A vízzel telített betonban minimumot ér el, száraz betonban maximális (*22.6. ábra*). Az irodalom szerint akkor kell korrózióval számolni, ha a beton fajlagos elektromos ellenállása 5000–10 000 Ohm alá csökken, amit erre alkalmas szondákkal lehet mérni.

c) A harmadik környezeti feltétel az oxigénnek az acélbetéthez jutása, amely függ a betonfedés vastagságától, tömörségétől és víztartalmától. *Tuutti* (1982) szerint, amíg a betonfedés 20 mm-ről 50 mm-re nő, addig az oxigéndiffúzió kb. egytizedére csökken (*22.6. ábra*). A *22.7. ábra* az oxigéndiffúzió nedves-



22.5. ábra. A nedvesedés hatása a beton elektromos ellenállására [*Hartl* (1984)]

ségtartalomtól való függését is mutatja. Ahogy közelít a környező levegő relatív légnedvesség-tartalma a 100%-hoz, az oxigéndiffúzió úgy tart a nullához, mert a beton pórusai teljesen víztelítettek lesznek.

A korróziós folyamat e két feltétele az elektromos vezetőképesség és az oxigéndiffúzió ellentétesen befolyásolják egymást. Minél vízzel telítettebb a beton, annál kisebb az oxigéndiffúzió. Hasonlóan: minél szárazabb a beton, annál kisebb az elektromos vezetőképessége, emiatt a korrózió megszűnik, jóllehet oxigén legnagyobb mértékben jut az acélhoz.

Legnagyobb a korrózió sebessége, ha a beton átnedvesedése és kiszáradása gyakran váltakozik, vagy ha egyes szerkezeti részek tartósan átnedvesednek (pl. a vízszigetelés meghibásodása miatt), egyidejűen más helyeken az O_2 a betonacélhoz jut. *A víznek és az oxigénnek tehát egyidejűen, nem egy helyen kell hatnia.*

Összefoglalva a három feltételt:

– a CO_2 megszünteti az acél passzivitását,

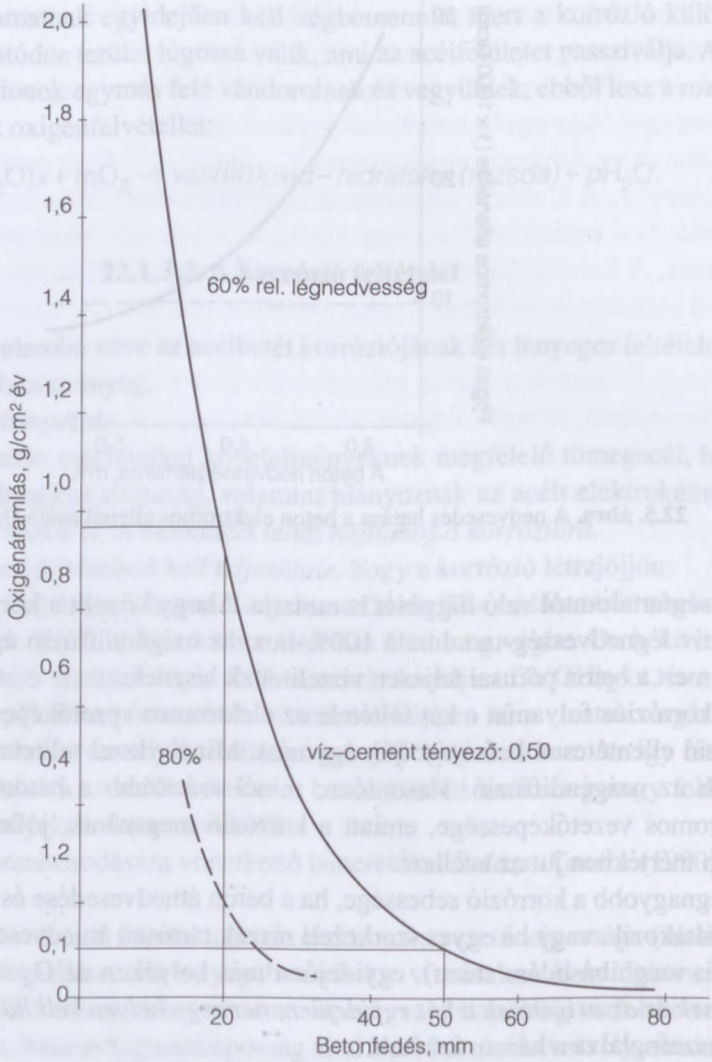
– a vízben oldott ionok, így általában a víz a betont elektromosan vezetőképessé teszi és részt vesz a rozsdaképződésben,

– oxigéndiffúzió szükséges az acél korróziójához, a rozsdaképződéshez.

A depasszíválódás tehát pusztán alapfeltétele a korróziónak, de a folyamat csak a víz és az oxigén odajutásával indul meg.

A három feltétel egyidejű hatását a *22.8. ábra* szemlélteti. Míg a karbonátosodás 40–60% relatív légnedvesség-tartalom esetén a legnagyobb, a korróziós veszély maximuma 70–80% relatív légnedvesség-tartalomnál van. Csak a vonalkázott területnek megfelelő körülmények elegendők a korrózióhoz.

Az acél korróziós érzékenységét a *Pourbaix-diagramban* szokás ábrázolni (*22.9. ábra*). Az ordinátán az acél elektródpotenciálja, az abszcisszán az acélt körülvevő



22.6 ábra. Oxigéndiffúzió a részlegesen száraz betonban [*Balázs–Kovács* (1989)]

vizes oldat pH-ja van feltüntetve. Ha kloridion nincs, csak a szokásos légköri szennyeződés van jelen, akkor következő tartományok vannak:

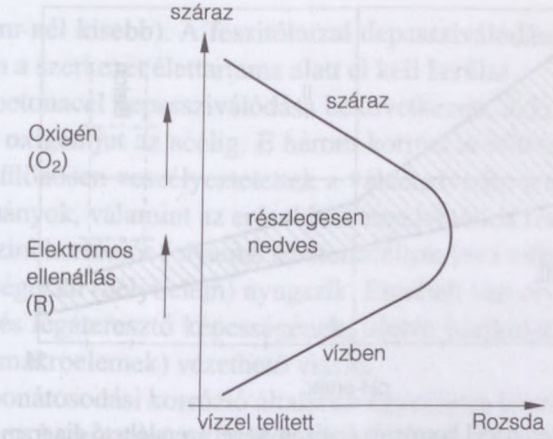
– I. aktív korrózió Fe^{2+}-ionok képződése közben,

– II. passziválódás vasoxidokból lévő, az acélon termodinamikusan stabilis védőréteg keletkezése által,

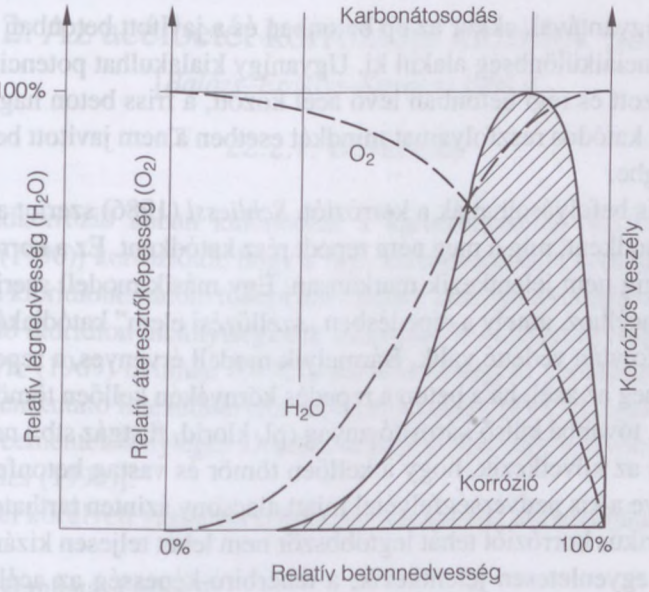
– III. az acél termodinamikai okokból nem tud korrodeálódni.

A nem karbonátosodott beton pH-ja 12–13, korrózióveszély nincs.

Nischer szerint nagyon fontos a beton utókezelése. Ugyanis 10 MPa-lal kisebb betonszilárdság a karbonátosodott réteg és ezáltal a korróziós veszély megháromszorozódását jelenti. Ha nincs lehetőség hosszú, nedves utókezelésre, akkor nagyobb be-



22.7. ábra. A korróziós ráta függése a beton nedvességtartalmától [*Brown* (1980)]

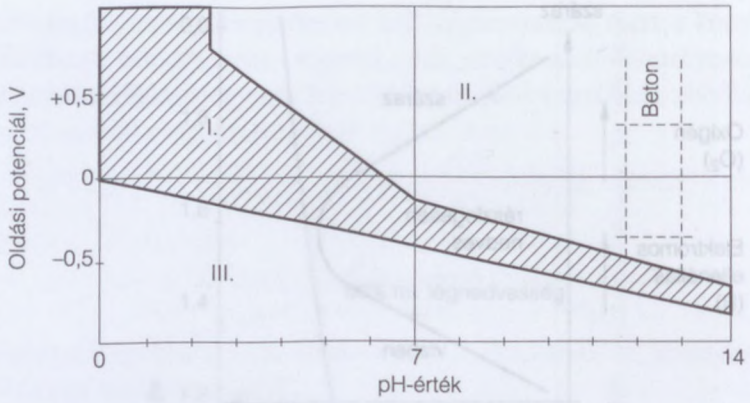


22.8. ábra. A korróziós paraméterek együtthatása *Wesche–Grübl* szerint [*Schrage* (1987)]

tonfedést kell választani. Szerinte szabadban lévő vasbetonszerkezetet max. 0,55 vízcement tényezővel, min. 30 MPa szilárdságúra kell készíteni. A nagyobb (pl. 0,7) vízcement tényezőjű, légpórusos betonok időjárásállók lehetnek ugyan, de az acélbetét védelme bizonytalan.

Fontos a reakció sebessége is. Ha csökken a katódhoz menő oxigén (ezt szellőzési elemnek is nevezik) utánpótlása, akkor lelassul az anód elektrontermelése és a fém oldódása, tehát a korrózió.

Schrage (1987) egy építőipari példát hozott fel a szellőzési elem képződésére. Ha a meghibásodott betonrészt eltávolítják, az acélt gondosan megtisztítják és légzá-



22.9. ábra. A betonacél korróziós érzékenységét szemléltető diagram [*Hartl* (1984)]

róan védik epoxigyantával, akkor az ép betonban és a javított betonban lévő acélrészek között potenciálkülönbség alakul ki. Ugyanígy kialakulhat potenciálkülönbség a frissen betonozott és régi betonban lévő acél között, a friss beton nagyobb alkálikussága miatt. A katódos részfolyamat mindkét esetben a nem javított betonban lévő acélon megy végbe.

A repedések is befolyásolhatják a korróziót. *Schliessl* (1986) szerint a repedés helye viselkedik anódként, míg a meg nem repedt rész katódként. Ez a korrózió 0,4 mm repedésszélességig nem jelentkezik markánsan. Egy másik modell szerint a repedésen át víz jut az acélhoz, amely a repedésben „szellőzési elem" katódjaként működik, és oxigénhiány folytán védetté válik. Bármelyik modell érvényes, a repedésben csak akkor védhető meg az acél, ha a beton a repedés környékén kellően tömör és a betonfedés megfelelő, továbbá külső károsító anyag (pl. klorid, füstgáz stb.) nem hat.

Mindezekből az következik, hogy a kellően tömör és vastag betonfedés esetén a korrózió veszélye a kis nedvességfelvétel miatt alacsony szinten tartható.

Az atmoszférikus korróziót tehát legtöbbször nem lehet teljesen kizárni. Ez a korrózió általában egyenletesen jelentkezik, a teherbíró-képesség az acél keresztmetszetének csökkenésével kisebb lesz. Ha pontkorrózió (lyukkorrózió) lép fel, az a statikus teherrel szembeni teherbírást eleinte általában nem csökkenti, de kedvezőtlen a dinamikus, valamint a fárasztó teherre, és nem engedhető meg feszített betonban.

22.1.3.3. Összefoglalás

a) Ha károsító anyagok nem hatolnak a betonba, akkor a acélbetét védelme szempontjából a betonfedés vastagsága és lég-, illetve vízzárása, azaz tömörsége a döntő. Ebben az esetben semmi veszélyt nem jelentenek azok a repedések, amelyek a szabványok szerint tervezett vasbetonban létrejönnek (szélességük

0,3 mm-nél kisebb). A feszítőhuzal depassziválódását a szerkezet minden részében a szerkezet élettartama alatt el kell kerülni.

b) Ha a betonacél depassziválódása bekövetkezett, akkor jön létre a korrózió, ha víz és oxigén jut az acélig. E három korróziós feltételnek együtt kell teljesülnie. Különösen veszélyeztetettek a váltakozva jól átnedvesedő és jól szellőző tartományok, valamint az erősebben átnedvesedett résztartományok.

c) A felszíni korróziós folyamat a betonacélban lévő mikroszkopikusan kis egyenlőtlenségeken (helyi elem) nyugszik. Emellett van olyan korrózió, amely a betonfedés légáteresztő képességének, illetve bázikusságának az egyenlőtlenségeire (makroelemek) vezethető vissza.

A karbonátosodási korrózió általában egyenletes korrózió, a tartó teherbíró képessége a keresztmetszet-csökkenésnek megfelelően csökken.

22.2. Az acélbetét korróziója kloridok hatására

[*Balázs–Erdélyi–Kovács* (1991)]

22.2.1. Bevezetés

Az ún. kloridkorrózió abban különbözik a karbonátosodás okozta (légköri) [*Balázs–Kovács* (1990)] korróziótól, hogy a nem karbonátosodott zónában is létrejöhet a korrózió, ha a kloridiontartalom túllépi azt a határt, amelyet a cement tartósan leköthet.

A leköthető kloridion mennyiségének tekintetében nincsen egyetértés, mert míg a német *Richartz* (1969) nyomán 0,4% (a cement tömegére vonatkoztatva), addig az Osztrák Cementkutató Intézetben [*Rechberger* nyomán (1983)] legalább 1%-ot tételeznek fel. A cementek tényleges kloridkötő képességét még a jövőben kell tisztázni [*Balázs–Kovács* (1991)].

A levegővel körülvett vasbeton szerkezet betonacélja korróziójának három feltétele van:

- A beton kémhatása $pH < 9$,
- A betonban lévő víz a betont vezetővé teszi, és kémiailag részt vesz a korrózióban,
- Az oxigén az acélhoz jut, és elősegíti a korróziót.

22.2.2. Kloridionok hatása az acélok korróziójára

A kloridionok az ún. légköri korrózió mechanizmusát a következők szerint változtatják meg:

a) A kloridkorrózió akkor is létrejöhet, ha a karbonátosodott réteg nem ér az acélbetétig. A karbonátosodott zónának ezen felül hátránya, hogy abban a klorid-

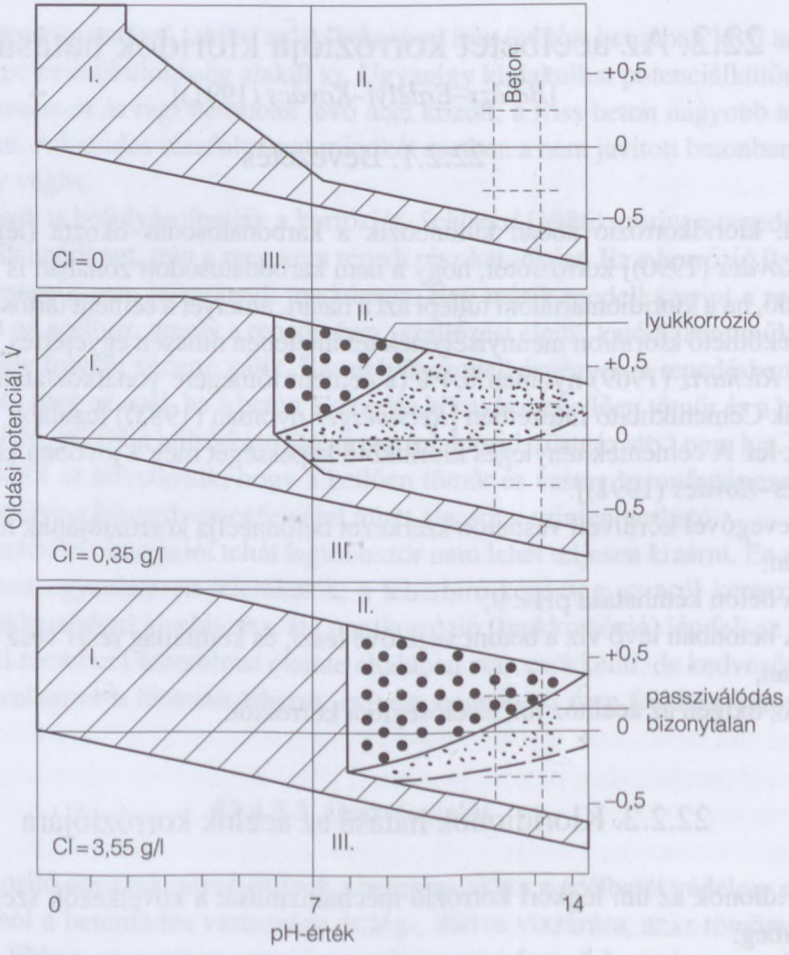
ion egyáltalán nem kötődik meg, tehát a minimális kloridmennyiség is korróziót hozhat létre.

A kétféle korrózió megjelenési formája is eltér egymástól.

A kloridkorróziónál különbséget kell tenni abban, hogy a kloridhatás alkalikus környezetben (pH > 9) következik-e be vagy karbonátosodott betonban. Alkálikus környezetben a kloridionok a védőréteget csak helyileg támadják, ami pont- vagy lyukkorrózióhoz vezet. Ennek a korróziónak is feltétele a megfelelő mennyiségű víz és oxigén jelenléte.

Védelem nélkül vagy karbonátosodott zónában lévő acél egyenletes korrózióját a kloridionok csak meggyorsítják [*Hartl* (1984)].

A *22.10. ábrán* a leegyszerűsített *Pourbaix-diagramban* azt szemléltetjük, hogy a kloridionok hogyan változtatják meg a korróziós tartományokat. Az *a)*



22.10. ábra. A kloridionok hatásának az ábrázolása leegyszerűsített Pourbaix-diagramban [*Brown* (1980)]

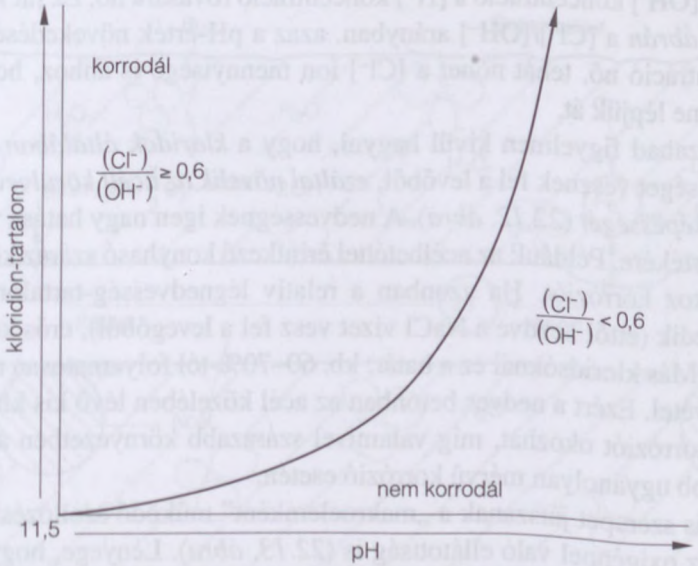
ábra a kloridion nélküli betonra vonatkozik; a *b)* ábra a kicsi, a *c)* ábra a nagy kloridtartalom hatására bekövetkező változást tünteti fel. Az ordinátán az acél elektródpotenciálja, az abszcisszán az acélt körülvevő vizes oldat pH-ja van feltüntetve. Ha kloridion nincs, mint az a) ábrán, akkor a következő tartományok vannak:

– I.: aktív korrózió Fe^{2+} -ionok képződése közben,
– II.: passziválódás vas-oxidokból lévő, az acélon termodinamikusan stabilis védőréteg keletkezése által,
– III.: az acél termodinamikai okokból nem tud korrodálni.

A b) és a c) ábrán jól látható, hogy a passzivált tartomány a kloridiontartalom növekedésével egyre csökken és különösen fontos a kloridkorrózió esetén a beton megfelelő bázikussága, nagy pH-ja. Tehát a pH semmiképpen ne csökkenjen 9 alá.

Más megvilágításban szemlélteti a problémát a *22.11. elvi ábra* [*Erlin–Verbeck* (1975)]. Amennyiben a pórusvíz kloridiont tartalmaz, úgy a pH > 9 határérték nem elegendő biztosíték a betonacél passzivitásának megítéléséhez. Ilyenkor szükséges ismerni a hígítatlan pórusvíz konkrét pH-értékét, amiből az OH^- ion koncentrációja kiadódik, továbbá ismerni kell a kloridiontartalmat is. E kettő aránya határolja le a passzivitási zónát.

Erlin és *Verbeck* szerint (1975), amennyiben ez a kloridion-hidroxilion arány nagyobb 0,6-nál, akkor a betonacél elveszíti passzivitását. (A német kutatók szerint ez a határérték 0,75.) Értelemszerűen a növekvő pH érték növekvő hidroxilion-koncentrációt jelent, így a passzivitási határérték a pH függvényében változik.



22.11. ábra. A korróziós veszélyeztetettség a kloridtartalom és a pH függvényében [*Erlin–Verbeck* (1975)]

Ennek magyarázataként vissza kell utalnunk a pH-érték értelmezésére. Mint köztudott, a víz magában is elektrolitos disszociációt szenved, így felírható az egyensúlyára jellemző disszociációs állandó:

$$K_a = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]}$$

Ez az állandó rendkívül kicsi, mert a nem disszociált víz egyensúlyi koncentrációja igen nagy. Jó közelítéssel állítható, hogy ez az egyensúlyi koncentráció a disszociáció következtében nem változik, így értéke állandónak vehető, és összevonható a K_d értékével. Így

$$K_v = K_d[H_2O] = [H^+] \cdot [OH^-],$$

aminek az értéke 25 °C-on $1{,}0 \cdot 10^{14}$.

Tiszta vízben a hidrogén- és hidroxilion-koncentráció azonos, ezért:

$$[OH^-] = [H^+] = 10^{-7} \text{ mol/}\ell$$

Lúgos közegben az $[OH^-]$ koncentráció nő a H^+ koncentráció rovására; savas közegben fordítva.

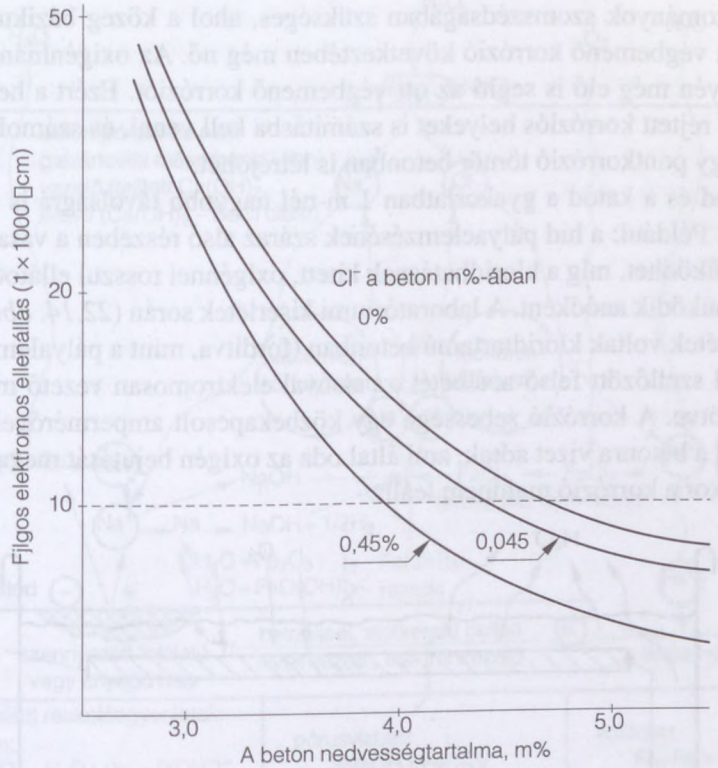
Mivel a rendkívül kis számokkal nehéz dolgozni, bevezették ennek negatív logaritmusát, a pH-értéket:

$$pH = +\lg[H^+].$$

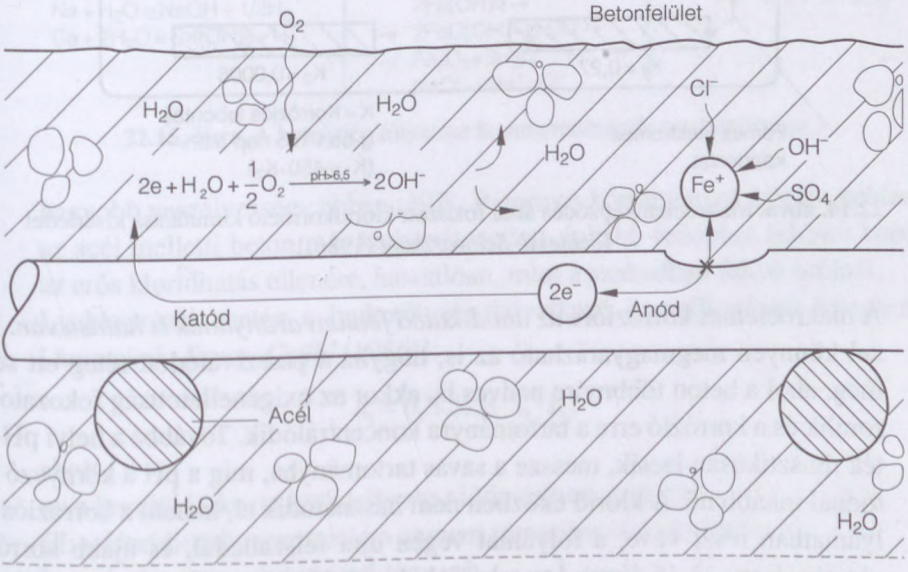
Következésképpen, ha a pH-érték 7-nél nagyobb, akkor a lúgos jellegű anyagban az $[OH^-]$ koncentráció a $[H^+]$ koncentráció rovására nő. Ez jut kifejezésre a *22.11. ábrán* a $[Cl^-]/[OH^-]$ arányban, azaz a pH-érték növekedésével az OH^- koncentráció nő, tehát nőhet a $[Cl^-]$ ion mennyisége is ahhoz, hogy a 0,6-es arányt ne lépjük át.

b) Nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a *kloridok általában nedvszívók,* nedvességet vesznek fel a levőből, *ezáltal növelik az acélt körülvevő környezet vezetőképességét* (*22.12. ábra*). A nedvességnek igen nagy hatása van a korrózió mértékére. Például: az acélbetéttel érintkező konyhasó száraz környezetben alig okoz korróziót. Ha azonban a relatív légnedvesség-tartalom 76% fölé emelkedik (ettől kezdve a NaCl vizet vesz fel a levegőből), erős korrózió kezdődik. Más kloridsóknál ez a határ: kb. 60–70%-tól folyamatosan nő a nedvességfelvétel. Ezért a nedves betonban az acél közelében lévő kis kloridtartalom nagy korróziót okozhat, míg valamivel szárazabb környezetben a kloridhatár nagyobb ugyanolyan mérvű korrózió esetén.

c) Jelentős szerepet játszanak a „makroelemként" működő szellőzési viszonyok, tehát az oxigénnel való ellátottság is (*22.13. ábra*). Lényege, hogy ugyanúgy, mint a klorid nélküli korrózió esetén, ebben az esetben sem szükséges oxigén azon a helyen, ahol a korrózió létrejön. Az oxigén csak a katódként működő



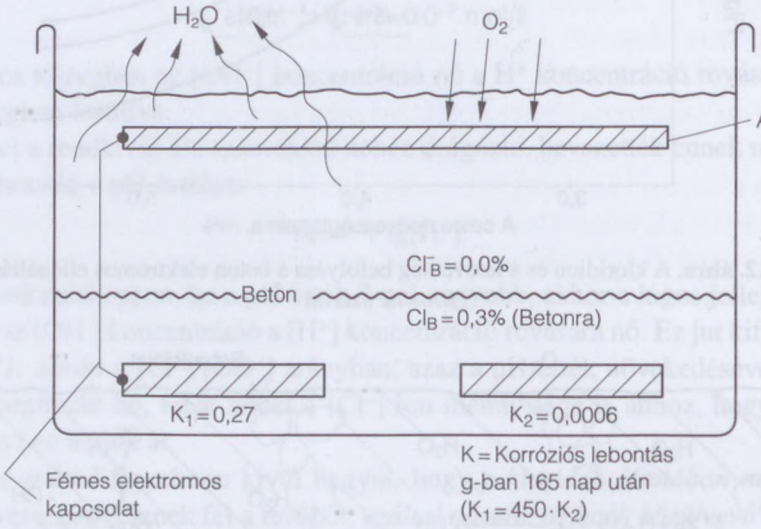
22.12. ábra. A kloridion és a nedvesség befolyása a beton elektromos ellenállására *Browne* szerint



22.13. ábra. A szellőzési viszonyok hatása az Evans szerinti korróziós elem képződésére [*Volkwein–Schwarzkopf* (1986)]

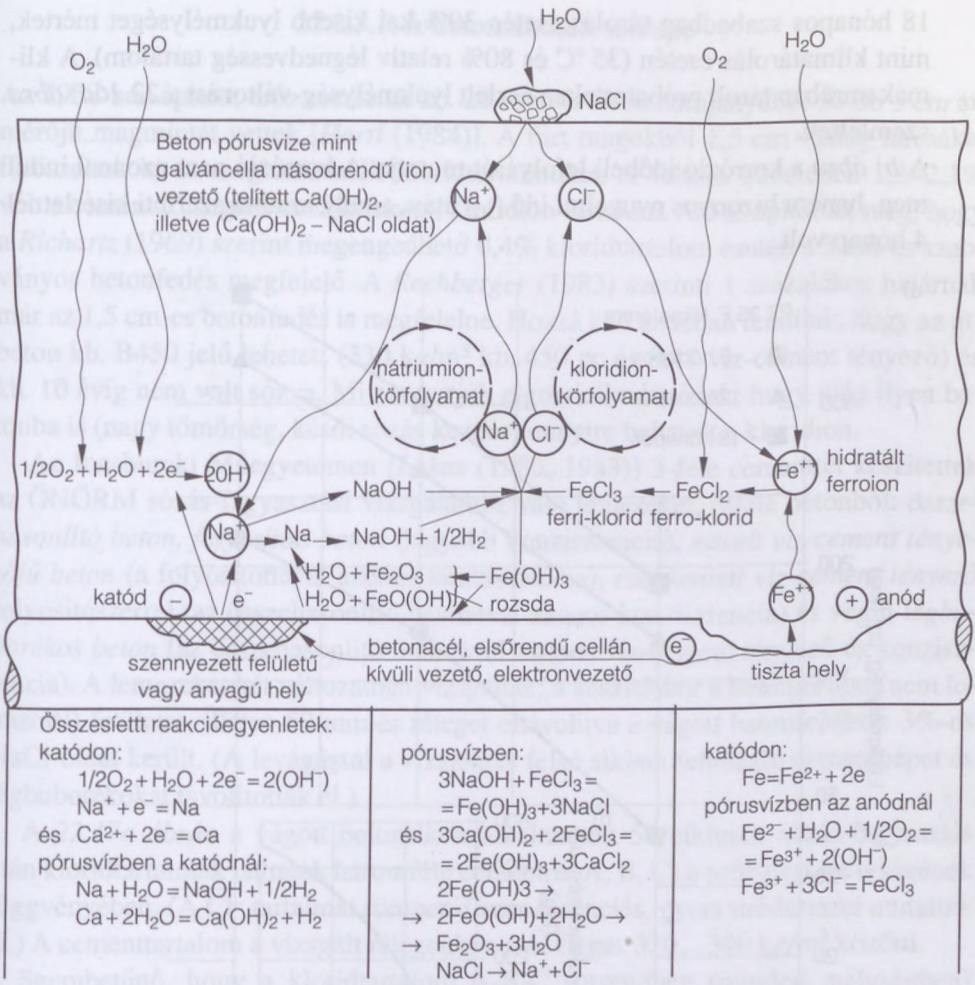
acéltartományok szomszédságában szükséges, ahol a közeg bázikus volta az anódon végbemenő korrózió következtében még nő. Az oxigénhiány a korrózió helyén még elő is segíti az ott végbemenő korróziót. Ezért a helyreállítás során a rejtett korróziós helyeket is számításba kell venni, és számolni kell azzal, hogy pontkorrózió tömör betonban is létrejöhet.

Az anód és a katód a gyakorlatban 1 m-nél nagyobb távolságra is lehet egymástól. Például: a híd pályaelemzésének száraz alsó részében a vasalás katódként működhet, míg a kloridhatásnak kitett, oxigénnel rosszul ellátott felső vasalás működik anódként. A laboratóriumi kísérletek során (*22.14. ábra*) az alsó acélbetétek voltak kloridtartamú betonban (fordítva, mint a pályalemezekben). Egy jól szellőzött felső acélbetét az alsóval elektromosan vezető módon volt összekötve. A korrózió sebessége egy közbekapcsolt ampermérővel mérhető. Ha fent a betonra vizet adtak, ami által oda az oxigén bejutását megakadályozták, akkor a korrózió majdnem leállt.



22.14. ábra. Makroelemképződés által fokozott kloridkorrózió kimutatása kísérlettel [*Schiessl–Schwarzkopf* (1986)]

A makroelemes korrózióra *az anód-katód felületi arányának is hatása van.* Ezzel könnyen megmagyarázható az is, hogyha a passzíválódott réteg ott sérül meg, ahol a beton többnyire nedves is, akkor az oxigénellátottság fokozatosan romlik és a korrózió erre a tartományra koncentrálódik. Továbbá a helyi pH-érték drasztikusan leesik, messze a savas tartományba, míg a pH a környező katódnál inkább nő. A klorid eközben nem használódik el, hanem a korróziós folyamatban részt véve, a folyamat végén újra felszabadul, és újabb korrózió okozója lesz (*22.15 ábra*). Így tehát a bekerült kloridion a korróziót katalizálja és annak fenntartását elvileg végtelen sok körfolyamatban teszi lehetővé. Leg-



Összesített reakcióegyenletek:

katódon:

$1/2O_2 + H_2O + 2e^- = 2(OH^-)$

$Na^+ + e^- = Na$

és $Ca^{2+} + 2e^- = Ca$

pórusvízben a katódnál:

$Na + H_2O = NaOH + 1/2H_2$

$Ca + 2H_2O = Ca(OH)_2 + H_2$

pórusvízben:

$3NaOH + FeCl_3 =$

$= Fe(OH)_3 + 3NaCl$

és $3Ca(OH)_2 + 2FeCl_3 =$

$= 2Fe(OH)_3 + 3CaCl_2$

$2Fe(OH)3 \rightarrow$

$\rightarrow 2FeO(OH) + 2H_2O \rightarrow$

$\rightarrow Fe_2O_3 + 3H_2O$

$NaCl \rightarrow Na^+ + Cl^-$

katódon:

$Fe = Fe^{2+} + 2e$

pórusvízben az anódnál

$Fe^{2-} + H_2O + 1/2O_2 =$

$= Fe^{3+} + 2(OH^-)$

$Fe^{3+} + 3Cl^- = FeCl_3$

22.15. ábra. A korróziós folyamat fennmaradásának mechanizmusa

nagyobb veszélyessége ebben rejlik. Bizonyos körülmények között, például ha az acél melletti beton már karbonátosodott, inkább felléphet felszíni korrózió az erős kloridhatás ellenére, hasonlóan, mint a szabadban fekvő acélnál.

Lyukkorrózió esetén a lyukmélység következő összefüggéssel fejezhető ki [*Jungwirth–Beyer–Grübl* (1986)]:

$$a_t = (Cl^-)_{0,85} \cdot k_t \cdot k_L,$$

ahol:

a_t: a korrózió okozta lyukmélység t időpontban, mm-ben,

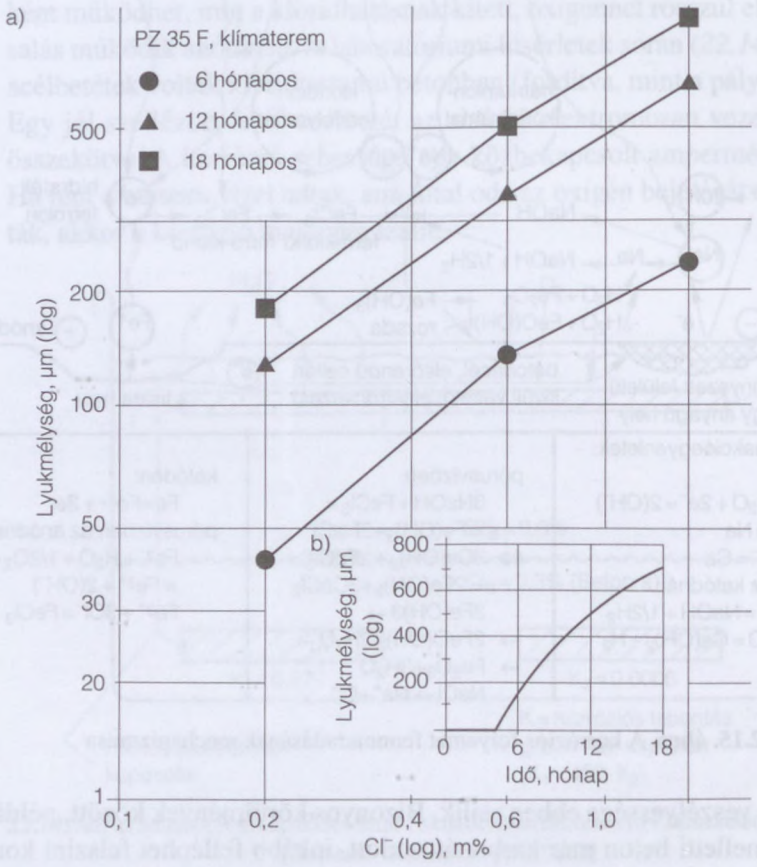
Cl: a kloridion-koncentráció a cement tömegére vonatkoztatva,

k_t: a tárolás tartamát kifejező tényező,

k_L: a tárolás módját kifejező tényező.

18 hónapos szabadban tárolás esetén 30%-kal kisebb lyukmélységet mértek, mint klímatárolás esetén (35 °C és 80% relatív légnedvesség tartalom). A klímakamrában tárolt próbatesteken észlelt lyukmélység-változást a *22.16a) ábra* szemlélteti.

A *b) ábra* a korrózió időbeli lefolyását mutatja. A korrózió nem azonnal indul meg, hanem bizonyos nyugalmi idő (t_0) után, amely az ábra szerinti kísérletnél 4 hónap volt.



22.16. ábra. A korróziós mélység változása; a) a cementre vonatkoztatott kloridion-tartalom és az idő függvényében; b) a korróziós mélysége időfüggése [*Jungwirth–Beyer–Grübl* (1986)]

22.2.3. Kloridbehatolás a betonba

Ha a klorid az acélbetétig hatol, akkor elektrokémiai korrózióval kell számolnunk. Ezért indokolt annak a megvizsgálása, hogy milyen tényezők befolyásolják a kloridionok betonba hatolását.

22.2.3.1. A betonalkotók szerepe

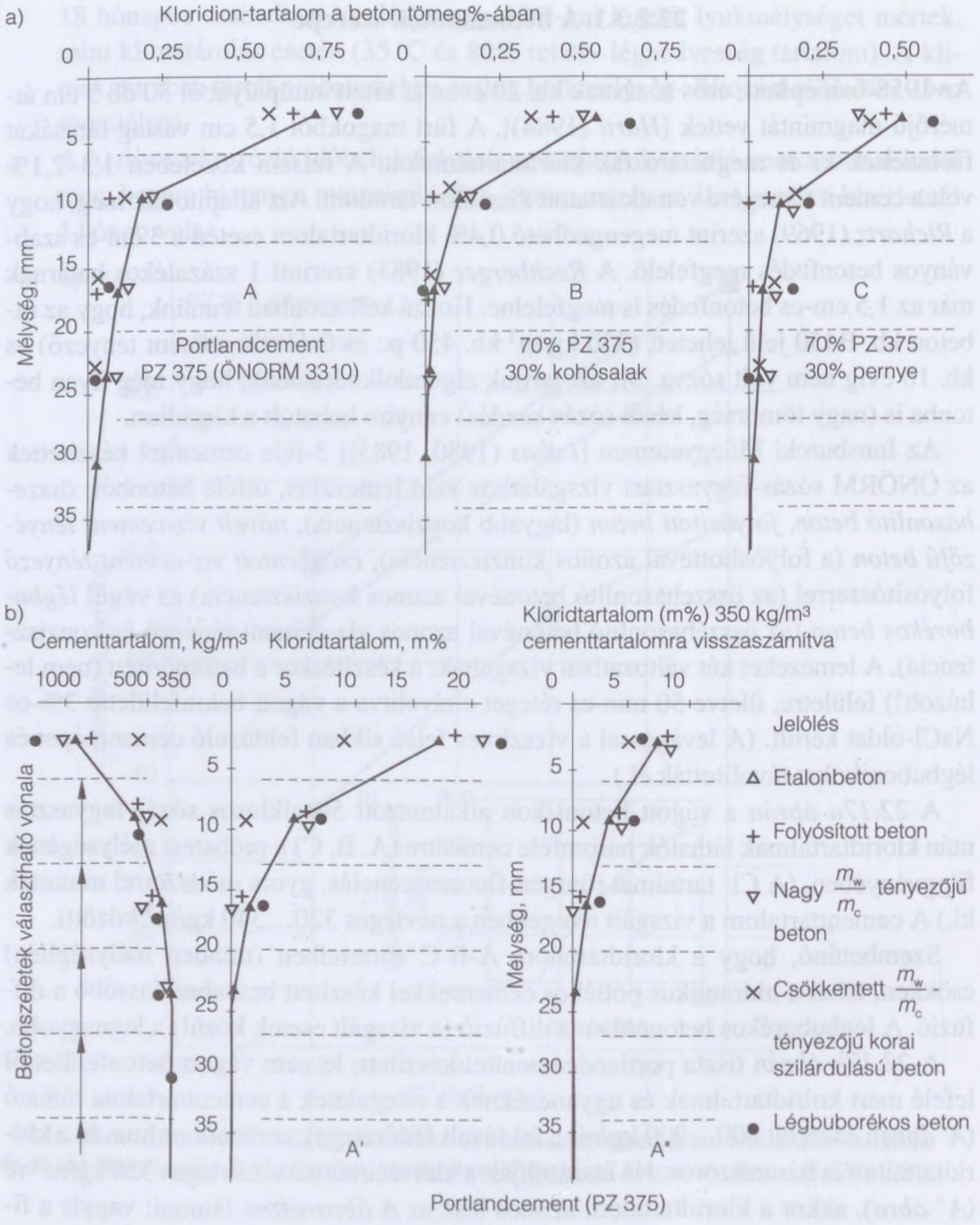
Az 1958-ban épített, erős sózásnak kb. 20 éven át kitett autópályából 30 db 5 cm átmérőjű magmintát vettek [*Hartl* (1984)]. A fúrt magokból 1,5 cm vastag tárcsákat fűrészeltek ki és meghatározták kloridtartalmukat. A felszín közelében 1,3–2,1% volt a cement tömegére vonatkoztatott kloridion-tartalom. Azt állapították meg, hogy a *Richartz* (1969) szerint megengedhető 0,4% kloridtartalom esetén a 3 cm-es szabványos betonfedés megfelelő. A *Rechberger* (1983) szerinti 1 százalékos határnak már az 1,5 cm-es betonfedés is megfelelne. Hozzá kell azonban tennünk, hogy az útbeton kb. B450 jelű lehetett (330 kg/m^3 kb. 450 pc és 0,41 víz-cement tényező) és kb. 10 évig nem volt sózva. Mi azt tartjuk elgondolkodtatónak, hogy még ilyen betonba is (nagy tömörség, késői sózás kezdés) ennyire behatolt a kloridion.

Az Innsburcki Műegyetemen [*Lukas* (1980, 1983)] 3-féle cementtel készítettek az ÖNÖRM sózás-fagyasztási vizsgálathoz való lemezeket, ötféle betonból: *összehasonlító beton, folyósított beton* (lágyabb konzisztencia), *növelt víz-cement tényezőjű beton* (a folyósítottéval azonos konzisztencia), *csökkentett víz-cement tényező* folyósítószerrel (az összehasonlító betonéval azonos konzisztencia) és végül *légbuborékos beton* (az összehasonlító betonéval azonos víz-cement tényező és konzisztencia). A lemezeket két változatban vizsgálták: a készítéskor a betömörített (nem lehúzott!) felületre, illetve 50 mm-es réteget eltávolítva a vágott betonfelületre 3%-os NaCl-oldat került. (A levágással a vízszintes felső síkban feldúsuló cementpépet és légbuborékokat távolították el.)

A *22.17a ábrán* a vágott betonsíkon alkalmazott 50 ciklusos sózás-fagyasztás után kloridtartalmak láthatók háromféle cementre (A, B, C) a próbatest mélységének függvényében. (A Cl^- tartalmat röntgen-fluoreszcenciás, gyors módszerrel mutatták ki.) A cementtartalom a vizsgált rétegekben a névleges 320…340 kg/m^3 közötti.

Szembetűnő, hogy a kloridtartalom A-B-C sorrendben (minden mélységben) csökken, tehát a hidraulikus pótlékos cementekkel készített betonban lassúbb a diffúzió. A légbuborékos betonokban a diffúzió (a vizsgált esetek közül) a legnagyobb.

A *22.17b ábrán* tiszta portlandcementtel készített, le nem vágott betonfelülettől lefelé mért kolridtartalmak és ugyanezeknek a rétegeknek a cementtartalma látható (*A' ábra*): eszerint 800…900 kg/m^3 a feldúsult fedőrétegek cementtartalma, és a kloridtartalom is háromszoros. Ha átszámítják a kloridtartalmat a névleges 350 kg/m^3-re (*A" ábra*), akkor a kloridtartalom azonos lesz az *A ábrarészen* látottal: vagyis a finomhabarcsban, cementben, vízben dúsabb, felső vízszintes rétegek fokozott kloridtartalma nem a betonfajták, hanem a felületkészítési mód hibája.



22.17. ábra. Kloridtartalom és behatolásmélység különböző betontechnológiai paraméterek esetén [*Lukas* (1980, 1983)]

Összefoglalás

- A víz-cement tényező növekedésével a kloridbehatolás nő.
- A tervezett cementtartalom 15...20 mm mélységben található meg, felette a szétosztályozódás és nagyobb porozitás miatt más, és emiatt a kloridtartalom is *feldúsul az átlagos betonstruktúrához képest.*
- A légpórusok egyrészt a felső rétegben siettetik a szétosztályozódást (és így a kloridfeldúsulást is), de még a felszíntől 50 mm mélyen lévő betonokban is valamivel nagyobb az LP-betonok kloridtartalma, ami talán a buborékrendszerrel lehet kapcsolatban.
- A nagy kezdőszilárdságú, a folyósító adalékszer révén csökkentett víz-cement tényezőjű betonokban is kisebb a kloridbehatolás.
- A hidraulikus pótlékok hatása egyértelműen kedvező.

Rehm és munkatársai (1988) is azt állapították meg, hogy a víz-cement tényezőnek (kapilláris porozitás) nagy a hatása a kloridbehatolás mélységére. Amíg a víz-cement tényező 0,4-ről 0,5-re, illetve 0,5-ről 0,7-re nőtt, addig a kloridtartalom 3 cm mélységben 2,5–3-szorosára emelkedett.

Ahogy előbb is bemutattuk a *cementfajtának is nagy a hatása.* Míg 1 cm mélységben kb. független volt a kloridion-tartalom a cementfajtától, addig 3 cm mélységben 10-szer nagyobb volt a pc, mint kohósalak-portlandcement esetében (70% kohósalak). Az S-54 típusú portlandcement hatása nem tért el lényegesen a 450 pc-étől.

A kloridbehatolás nőtt d_{max} növelésével. Amíg a d_{max} 8-ról 16 mm-re nőtt, addig a kloridtartalom kb. 2,1-szeresére, amíg 8-ról 32-re, addig kb. 3-szorosára nőtt. A d_{max} növelésének hatása annál nagyobb volt, minél nagyobb volt a betonfedés. Ez azzal magyarázható, hogy a kloridionok az adalékanyag és cementkő határfelületén jobban behatolnak, mint a cementkőben.

Kísérleteik alapján hidakon a következő betonfedést ajánlják [*Rehm* és munkatársai (1988)] hazai cementekkel kifejezve:

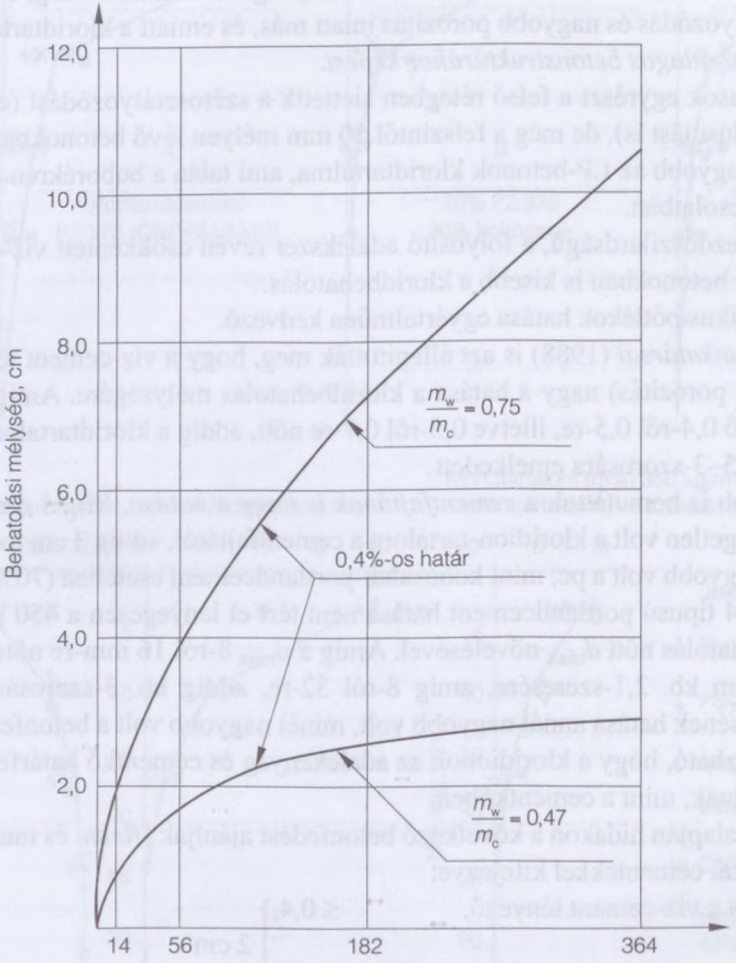
- 450 pc, ha a víz-cement tényező, $\leq 0{,}4$, illetve
- 250 kspc 60, ha a víz-cement tényező $\leq 0{,}5$,

} 2 cm

- 450 pc, ha a víz-cement tényező $\leq 0{,}5$:4 cm,
- 450 pc, ha a víz-cement tényező $\leq 0{,}7$:6 cm.

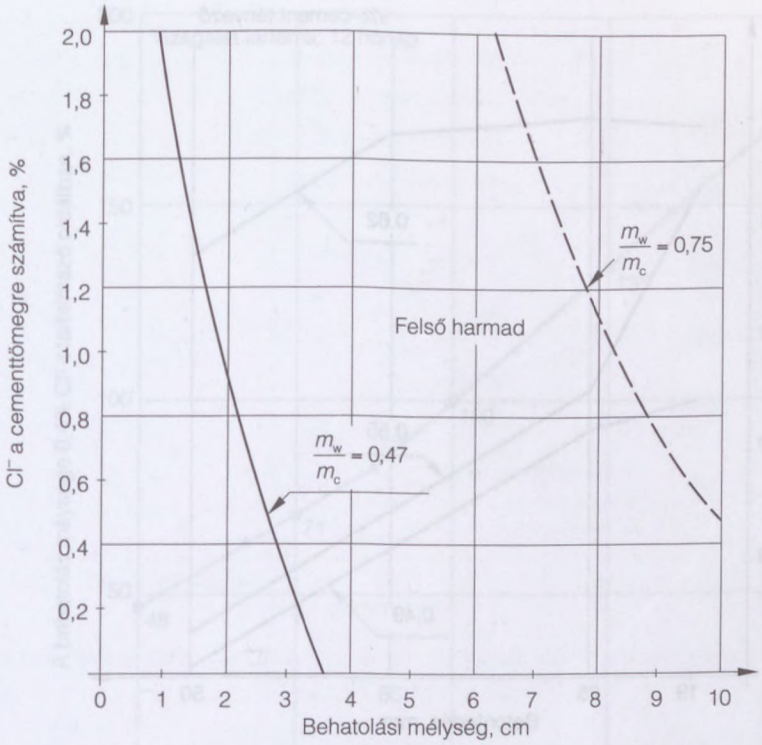
Az NSZK-ban [*Weigler–Segmüller* (1973)] 20·20·12 cm-es vízzárósági lemezeket vizsgáltak 0,5%-os NaCl-oldatban úgy, hogy az álló lapnak egyetlen 20×20 cm^2-es felületét érte a változtatott szintmagasságú oldat, a többi oldalt többrétegű epoxibevonat zárta le. A cserélt és folyamatosan kevert oldatban való 1 éves tárolás után megállapították, hogy a kloridtartalom a legfelső, párolgó, mindig szárazon álló habarcsban a legnagyobb, ebben a zónában az egyébként kritikusnak tartott 0,4%-os kloridtartalom-határ (azaz 0,4 m% Cl^- a cement tömegére vonatkoztatva) már 10 cm

mélyen volt, ha a víz-cement tényező 0,75; de csak 3 cm mélyen, ha 0,47 volt (*22.18. ábra*). A beszivárgott kloridtömeg a felszínhez közel természetesen sokkal nagyobb volt (*22.19. ábra*).



22.18. ábra. A 0,4 m%-os Cl^- határ kétféle víz-cement tényező esetén [*Weigler–Segmüller* (1973)]

A *22.20. ábra* a betonfedés vastagságának és tömörségének a hatását együtt szemlélteti. A betonfedés tömörségét a víz-cement tényező juttatja kifejezésre. 25, illetve 38 mm-es betonfedés felett a víz-cement tényező a görbék párhuzamos eltolódását eredményezte. Ezért lehet hatását egy szorzótényezővel kifejezésre juttatni. A 0,49 és a 0,55 víz-cement tényező korróziós hatása között kicsi a különbség. 50 mm-es betonfedés esetén a két víz-cement tényezővel készített betonban már elhanyagolható volt a korrózió. Jóllehet ezt a korróziós állapotot olyan 2 éves vasbeton gerendán határozták meg, amelyeket szabadon, tartósan megrepedt állapotban



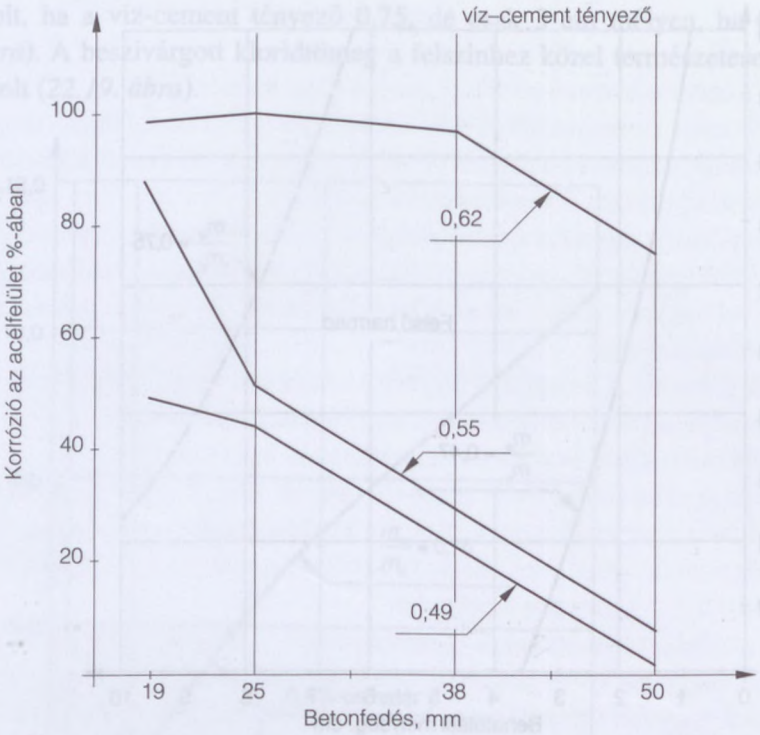
22.19. ábra. Összefüggés az elpárolgási szakaszban felgyülemlő kloridtartalom és a beton felszíntől való távolsága között, kétféle víz-cement tényezőre [*Weigler–Segmüller* (1973)]

naponta egyszer 3%-os NaCl-oldattal permeteztek. E kísérletek során a repedések lényeges hatását nem észlelték. A 0,6 körüli-feletti víz-cement tényező tehát megengedhetetlenül nagy.

A *22.21. ábra* szerint a *víz-cement tényezővel közel arányosan nő a kloridbehatolás mélysége.* Amíg a víz-cement tényező 0,4-ről 0,8-ra nőtt, addig a *kloridbehatolás* a 3,5-szerese lett.

Hartl (1984) szerint azonos víz-cement tényező esetén a több cement nagyobb tömörséget és jobb bedolgozhatóságot eredményez. A több cement növeli a nagy pH-hoz szükséges $Ca(OH)_2$ és a megköthető kloridion mennyiségét.

Beeby (1980) a cementtartalom és a betonfedés együttes szerepét tengeri környezetben lévő műtárgyakon végzett vizsgálatainak az eredményeivel jellemezte (*22.22. ábra*). Az ábrán minden jel egy építmény jele. A háromszöggel jelölt műtárgyak erősen rozsdásodtak, a körrel jelöltek kellően védettek voltak, négyszöggel a szabványos követelményeket jelölték. A szaggatott vonal a jó és a rossz eredmények határvonala. A kísérlet szerint a nagyobb cementtartalom kisebb betonrepedések esetén növeli a korrózióvédelmet, ami a tömörebb beton jelentőségére utal, feltéve, hogy gyakorlatilag azonos a konzisztencia.



22.20. ábra. A korrózió mértéke a víz-cement tényező és a betonfedés függvényében *Atimtay* és *Ferguson* (1973) szerint

Lukas (1983) kísérletei szerint (*22.23. ábra*) *a légbuborékképzővel készített betonba a kloridbehatolás nagyobb, mint az anélkülibe,* de az eltérés függ a víz-cement tényezőtől, ugyanis, ha a víz-cement tényező 0,55–0,70 közötti, akkor a különbség 30–50%; ha 0,4–0,5, akkor csak 10–20%. Továbbá a légbuborékos betonban nő a felső réteg szétkeveredési hajlama (lásd a *22.17. ábrát*).

Ettől eltérő vélemények is vannak, például a [Ständige (1979)] szerint a légbuborékos betonba (főleg a belsejébe, 5 cm-nél mélyebbre) a kloridion-beszivárgás kisebb, mint a légbuborék nélküli betonba (*22.24. ábra*), amint erre a *22.17. ábra* kapcsán már utaltunk is.

Az x_{max} behatolási mélység számításához $C = 0$ kloridkoncentráció esetére az egyenletet

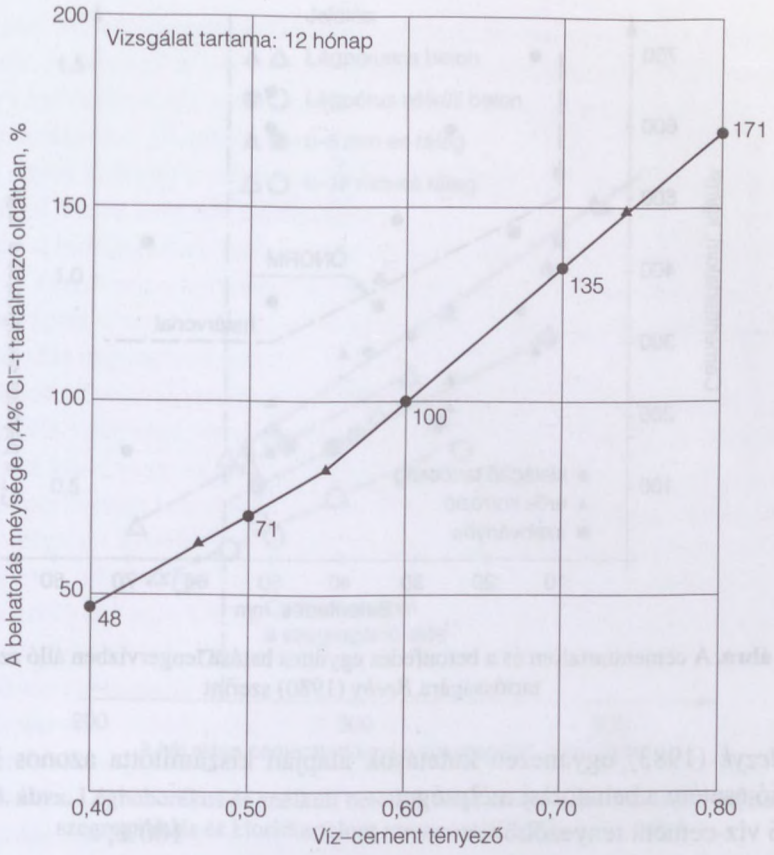
$$x_{max} = 4 \cdot \sqrt{D \cdot t}$$

alakban *Collepardi, Marcialis* és *Turriziani* (1983) vezette le 1970-ben. A képletben

D: diffúziós együttható, cm^2/s,

t: a behatolási idő, s.

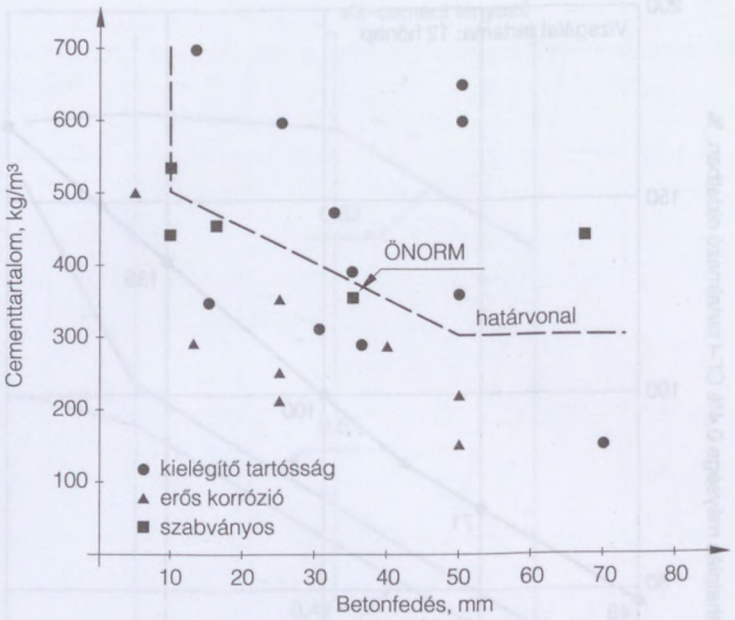
Az ilyen jellegű összefüggések korlátozás nélkül elsősorban csak pórusoldatokra érvényesek.



22.21. ábra. A víz-cement tényező hatása a kloridbehatolás mélységére *Ost* és *Monfore* (1974) szerint

Smolczyk (1983) *Bakker, Brodersen* és *Page* kutatási eredményei felhasználásával kiszámította a diffúziós együtthatót, és 0,6 víz-cement tényezőjű, 7 napig utókezelt beton áteresztőképességét 100%-nak véve, a következő értékeket kapta:

– 0,6 víz-cement tényező	100%,
– 0,5 víz-cement tényező	45%,
– 0,4 víz-cement tényező	20%,
– 7 napos nedves utókezelés	100%,
– 14 napos nedves utókezelés	55%,
– 28 napos nedves utókezelés	45%,
– tiszta pc	100%,
– kspc 40	25%,
– kspc 60	5%,
– kspc 80	1%,
– 0,4 víz-cement tényező és 14 napnál hosszabb utókezelés	10%.



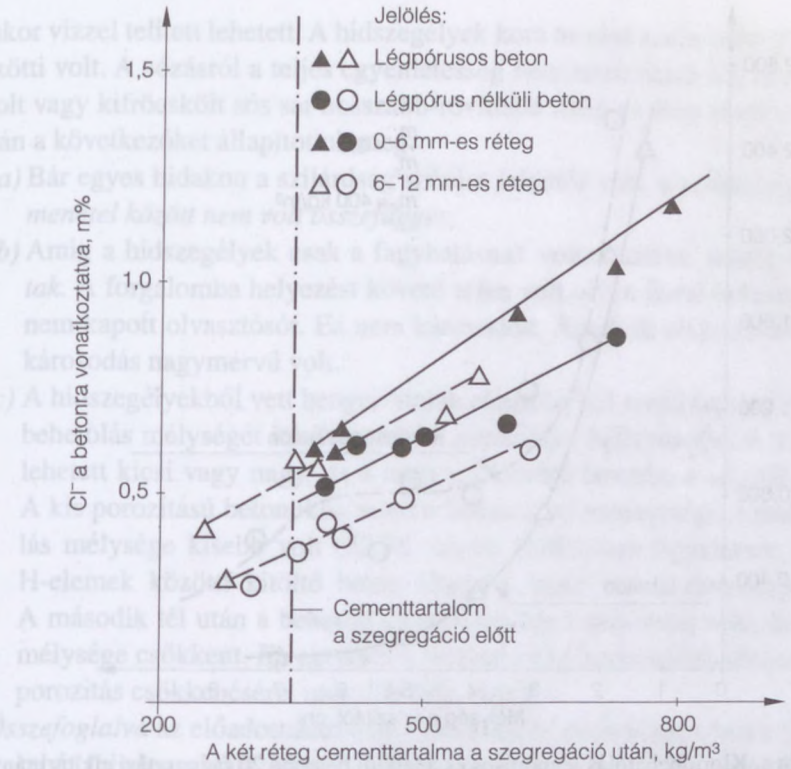
22.22. ábra. A cementtartalom és a betonfedés együttes hatása tengervízben álló szerkezetek tartósságára *Beeby* (1980) szerint

Smolczyk (1983) ugyanezen kutatások alapján kiszámította azonos kloridkoncentráció esetére a behatolási mélységet:

– 0,6 víz-cement tényezőhöz	100%,
– 0,5 víz-cement tényezőhöz	65%,
– 0,4 víz-cement tényezőhöz	45%,
– 7 napos nedves utókezeléshez	100%,
– 14 napos nedves utókezeléshez	75%,
– 28 napos nedves utókezeléshez	65%,
– tiszta pc-hez	100%,
– kspc 40	50%,
– kspc 60	20%,
– kspc 80	10%,
– 0,4 víz-cement tényező és 14 napnál hosszabb utókezeléshez	30%.

Eszerint a kspc 40 jelű cementektől már lényegesen kisebb kloridbehatolás várható, mint a tiszta pc-ektől.

A cement kohósalaktartalma hatását a *22.25. ábra* szemlélteti. *Smolczyk* (1983) arra is rámutatott, hogy a hőmérséklet hatása olyan nagy, hogy megbízható kísérlet csak állandó hőmérsékleten végezhető. Ha a tárolási hőmérséklet 15 °C-ról 25 °C-ra nő, akkor a diffúziós együttható kétszeres lesz: nagyobb hőmérsékleten tehát sokkal nagyobb korróziós sebesség várható.



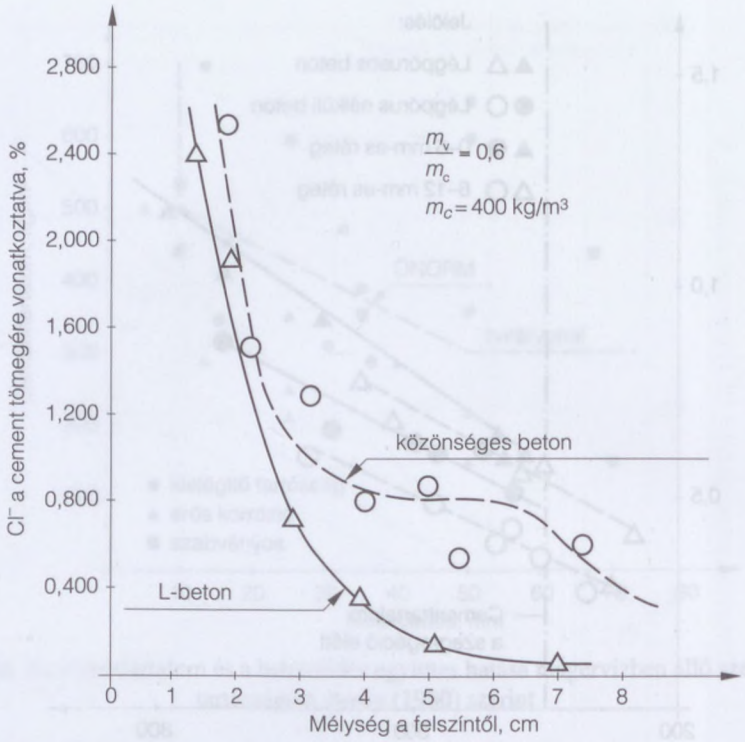
22.23. ábra. Légbuborékos és anélküli betonok felső rétegeinek az összehasonlítása szegregálódás és kloridtartalom szempontjából [*Lukas* (1983)]

A kísérletek és a számítások szerint tehát a *víz-cement tényező csökkentésének, a nedves utókezelésnek, a cement fajtájának* nagy a hatása a kloridbehatolás mélységére. Ehhez hozzávehetjük még a *beton korát* is a sózás kezdetének az időpontjában, amely a *hidratáció mértékét* juttatja kifejezésre. Mindez együtt a *beton porozitásában* nyilvánul meg. Ezt az M3 autópályán végzett vizsgálatainkkal támasztjuk alá [*Balázs–Borján–Erdélyi–Györkéné Horváth* M.*–Józsa–Kovács–Németh* (1984)].

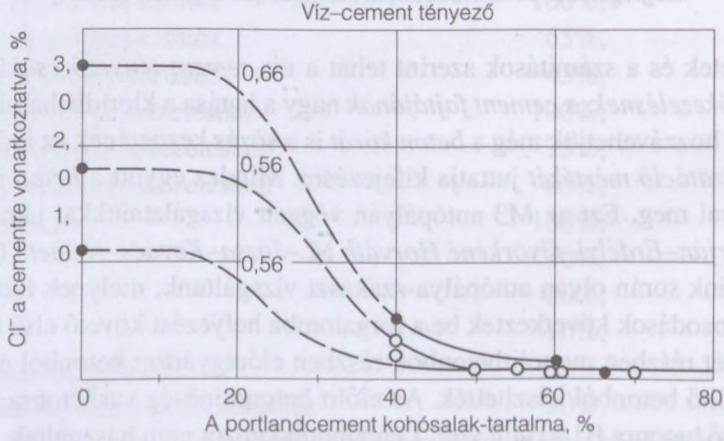
Kutatásaink során olyan autópálya-szakaszt vizsgáltunk, melynek hídszegélyein jelentős károsodások következtek be a forgalomba helyezést követő első télen. E hidak szegélyét részben monolitbetonból, részben előregyártott betonból és helyszíni monolit kitöltő betonból készítették. Az előírt betonminőség vasbetonra B200 vagy B280, kitöltő betonra B140 jelű volt. Légbuborékképzőt nem használtak.

A szegélyelemeket úgy tervezték és építették, ahogy akkor megszokták, amikor sózás még nem volt. A betonhoz 450 pc-t használtak fel. Csak a szilárdság volt előírva.

A hidak az autópályának kb. 20 km-es szakaszán találhatók. Megvizsgáltuk – a tönkremenetel okainak elemzéséhez – az időjárási viszonyokat. Bár ez az útszakasz időjárási zónahatáron fekszik, az időjárásban nagy eltérés nem volt. Az időjárás abszolút értelemben nem volt szélsőséges, azonban a tél hosszú volt, és az első hó



22.24. ábra. Kloridbehatolás légpórusos és anélküli betonba 20 fagyasztási ciklus után [Ständige (1979)]



22.25. ábra. A kloridtartalom a cement kohósalak-tartalma függvényében [*Wischers* (1983)]

korán leesett. A tél folyamán a komolyabb hóeséses napok száma 34, a sószórásos napoké 63, az összes kiszórt sómennyiség átlagosan 960 g/m², az összes csapadék 200 mm volt. Az első hóesés előtt esett le ennek a nagy része, így a beton az első só-

záskor vízzel telített lehetett. A hídszegélyek kora az első sózás előtt 2 hónap és 3 év közötti volt. A sózásról a teljes egyenletesség nem tételezhető fel. A szegélyelemre kitolt vagy kifröcskölt sós sár hosszabb-rövidebb ideig azokon tárolódott. A kutatás során a következőket állapítottuk meg:

a) Bár egyes hidakon a szilárdság szórása jelentős volt, *a szilárdság és a tönkremenetel között nem volt összefüggés.*

b) Amíg a hídszegélyek csak a fagyhatásnak voltak kitéve, *addig nem károsodtak.* A forgalomba helyezést követő télen volt olyan fiatal hídszegély, amelyik nem kapott olvasztósót. Ez nem károsodott. Amelyik olvasztósót kapott, ott a károsodás nagymérvű volt.

c) A hídszegélyekből vett hengerminták elemzéséből megállapítottuk, hogy a sóbehetolás mélységét inkább a *beton porozitása befolyásolja.* A kloridtartalom lehetett kicsi vagy nagy, de a nagy porozitású betonba a só mélyen behatolt. A kis porozitású betonokba mind a behatolt só mennyisége, mind a sóbehatolás mélysége kisebb volt (*22.26. ábra*). Különösen figyelemre méltó volt a H-elemek közötti kitöltő beton állapota, amelynek a porozitása 0,25 volt. A második tél után a behatolt só mennyisége rendszerint nőtt, de a behatolás mélysége csökkent. Ez egyrészt a felületi réteg karbonátosodására, másrészt a porozitás csökkenésére, utószilárdulásra utal.

Összefoglalva az előadottakat: a kloridbehatolás elsősorban a beton porozitásától függ, tehát minden olyan tényező növeli, amely növeli a bevitt légbuborék nélküli beton porozitását.

A behatolást növelő főbb betontechnológiai tényezők:

– A péphiányos beton,
– A rosszul tömörített beton,
– A nagy víz-cement tényező,
– A gyenge utókezelés.

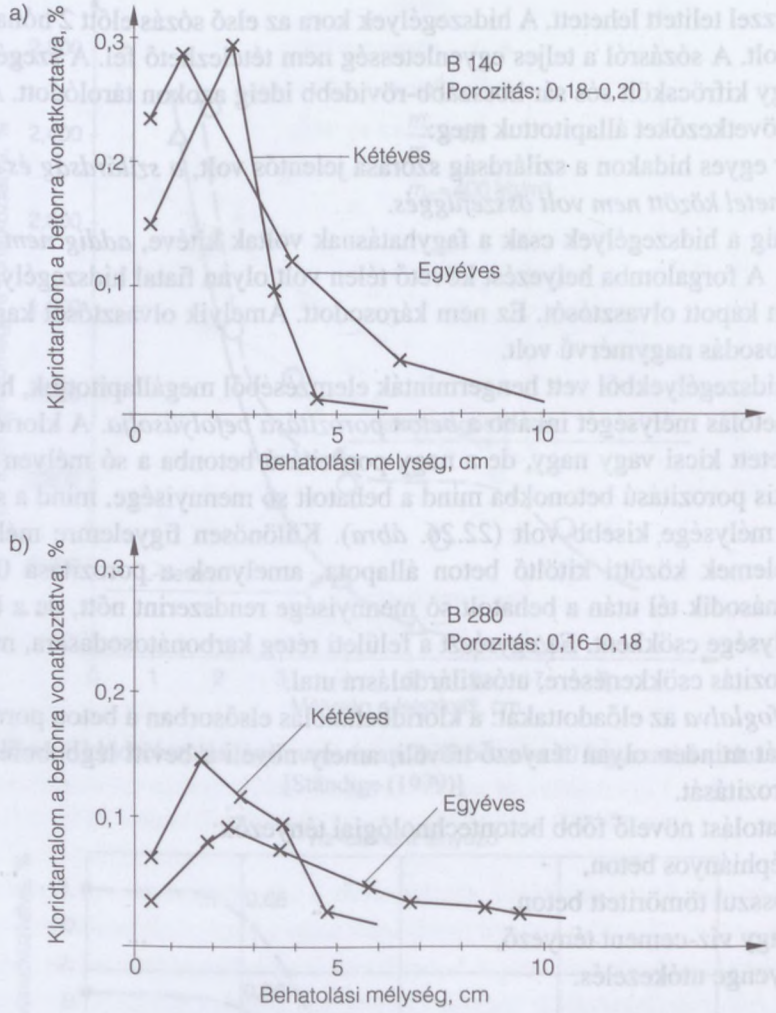
22.2.3.2. A kloridhatás módja közúti hídon

Az utólagos (betonozás utáni) kloridbehatolás felsorolt két esete közül [*Balázs–Kovács* (1991)] részletesen a téli sózás esetét vizsgáljuk meg.

A *22.27. ábra* szerint a só négyféleképpen juthat, például a híd betonjába:

– felszíni vízzel,
– szivárgó vízzel,
– szórt (permetezett) vízzel,
– és szitáló ködde l.

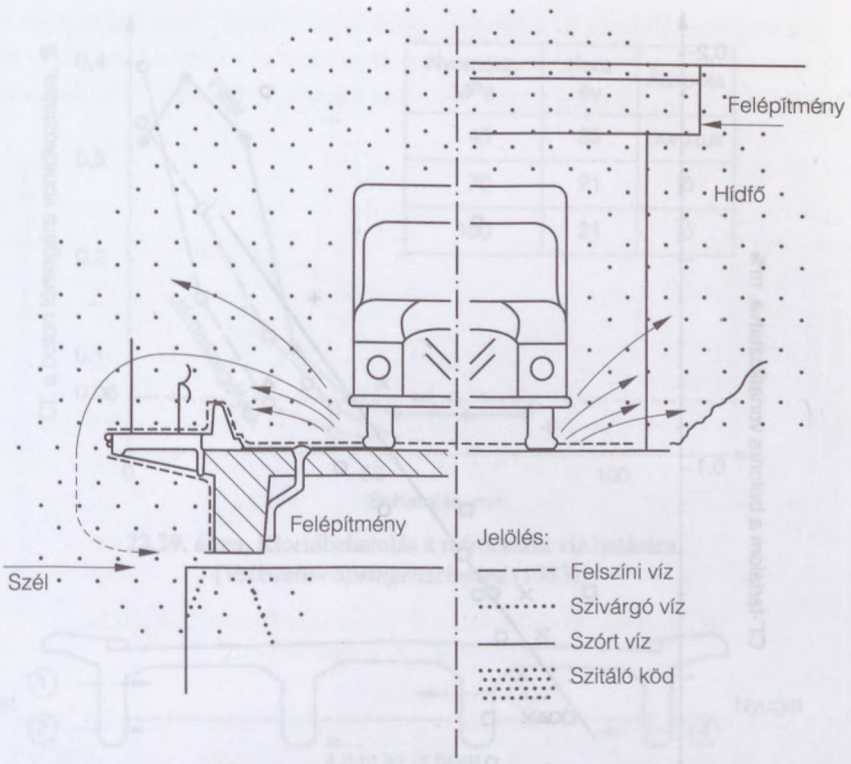
Legnagyobb a sóbehatolás ott, ahol a víz vagy sótartalmú hóolvadék megáll, nincs lefolyása, ezt követi – hatásában – a szivárgó víz.



22.26. ábra. A sóbehatolás nagy porozitású betonba; a) B140, b) B280 jelű [*Balázs* és társai (1984)]

Volkwein és *Springenschmied* (1982) megállapította, hogy nem hatol be a só a jól szigetelt pályalemezekbe. Nagy nyomószilárdságú, teljesen ép, de nem szigetelt betonba 50 mm-nél, részben károsodott betonokba 90 mm-nél is mélyebb volt a behatolás.

Springenschmied (1983) 1938-ban épített, kb. 15 évi sózásnak kitett útbetonok vizsgálata során 40–60 mm-es behatolási mélységet állapított meg. Azt is megállapította, hogy a menetirány szerinti jobb peremsávban kétszer annyi volt a behatolt só mennyisége, mint a bal peremsávban (a lejtés hatása). Továbbá a kifűrészelt kockák 1 perc alatti vízfelvétele és a 30 mm-es mélységben észlelt kloridtartalmak között lineáris összefüggést vélt felfedezni (*22.28. ábra*). Ilyen rövid idő alatt a makrokapillárisok telnek meg vízzel. A ráfröcskölt (szórt) víz hatására a kloridion 30–60 mm mélyen hatolt a betonba, miközben a nagy szilárdságú beton még nem károsodott



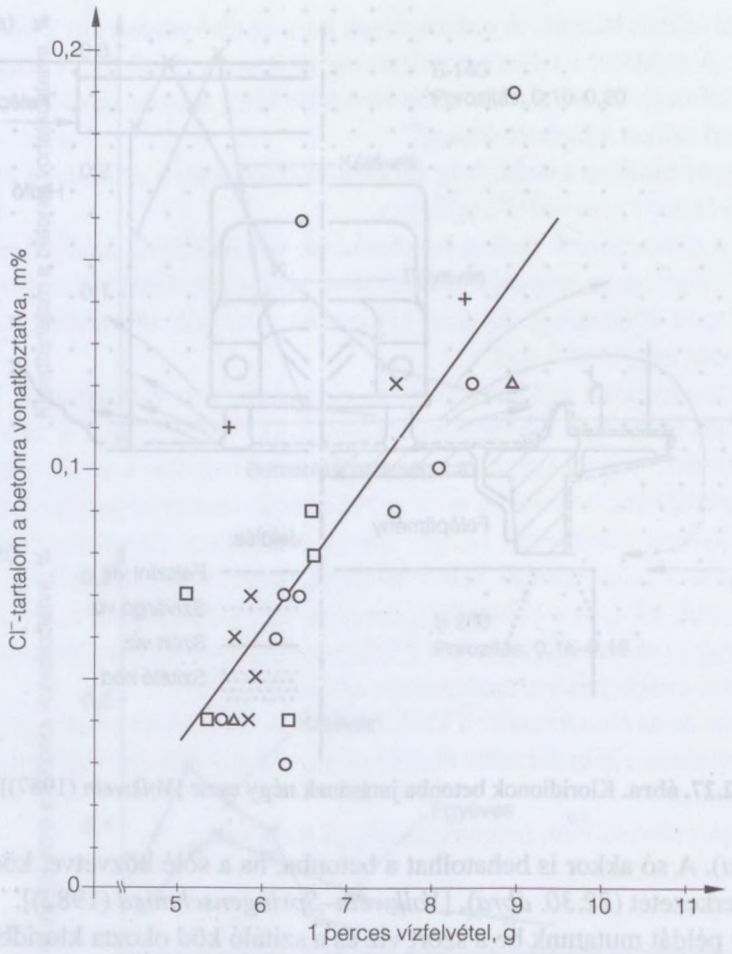
22.27. ábra. Kloridionok betonba jutásának négy esete [*Volkwein* (1987)]

(*22.29. ábra*). A só akkor is behatolhat a betonba, ha a sólé közvetve, köd formájában éri a szerkezetet (*22.30. ábra*), [*Volkwein–Springenschmied* (1982)].

Még egy példát mutatunk be a szórt víz és a szitáló köd okozta kloridbehatolásra (*22.31. ábra*). A vizsgált 9 híd 9–46 éves. A betonszilárdság nagy, azaz tömör beton esetén minden kloridbehatolás egy szűk tartományba esik. De világosan felismerhető volt a különbség a permetező víz és a szitáló köd tartománya között. Legalább a *permetező víz tartományában a betonfedést 30 vagy 40 mm fölé kellene növelni, vagy a betont védőbevonattal ellátni még az első sózás előtt.*

22.2.3.3. A kloridbehatolás egyéb esetei

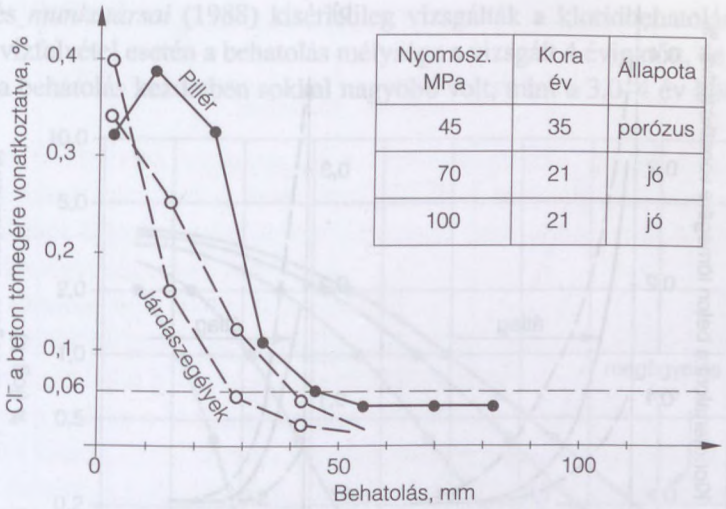
Ha a kloridtartalmú víz először száraz betonra hat, akkor a só a vízzel együtt kapillárisan felszívódik. A kloridionok majdnem olyan mélyre hatolnak, mint a víz (*22.32. ábra*). Az ábra a betonban a klorideloszlást tünteti fel (víz-cement tényező 0,5, illetve 0,6), a beton többhónapos, 77%-os légnedvesség tartalmú térben tárolás után 8 hónapig telített NaCl-oldatnak volt kitéve. Ugyanaz a beton, ha előzőleg vízzel volt telítve, akkor alig vett fel kloridot. A kloridionok tehát önállóan nagyon lassan



22.28. ábra. A kloridtartalom és az 1 perces vízfelvétel közötti összefüggés [*Springenschmied* (1983)]

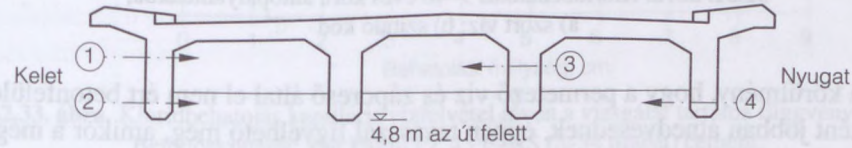
haladnak a betonba, fő szállítójuk a kapilláris vízfelszívás. Ezáltal válik nyilvánvalóvá a víz-cement tényezőnek és a hidratáció fokának, azaz az utókezelésnek a szerepe a kloridbehatolásra. A gyakorlatban a gyenge, önálló diffúziót bizonyítja azáltal nyilvánul meg, hogy különböző korú, összehasonlítható létesítményeknél a kloridbehatolási mélységben korfüggést nem találtak.

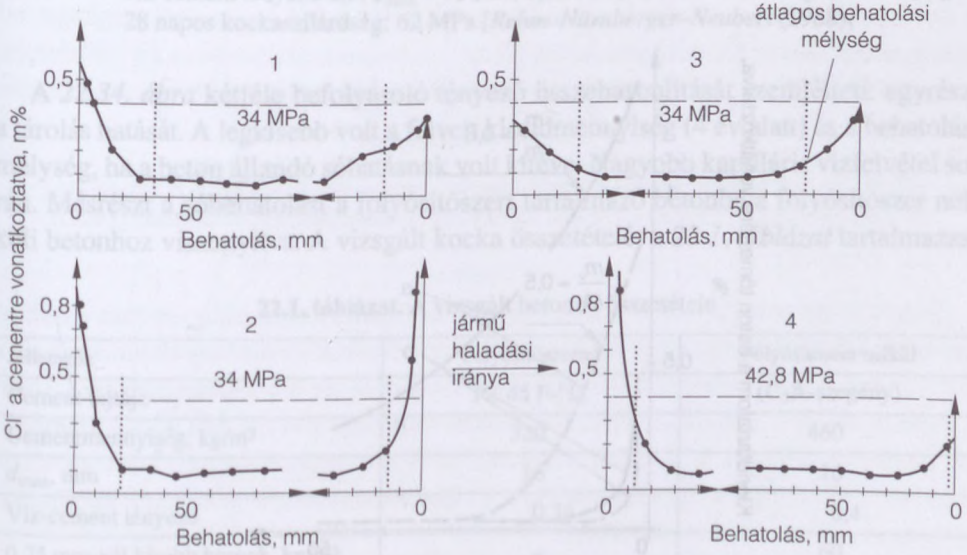
A kloridbehatolással együtt a minták nedvességtartalmát is meghatározták, a mérések szerint egy bizonyos mélységtől számítva állandó volt a nedvességtartalom. Ebből következik, hogy a légnedvesség-változás csak egy bizonyos mélységig hat: a vizsgált nagyon tömör betonoknál 50–60 mm-ig. Ez megfelel a kloridbehatolási mélységnek a permetező víz tartományában.



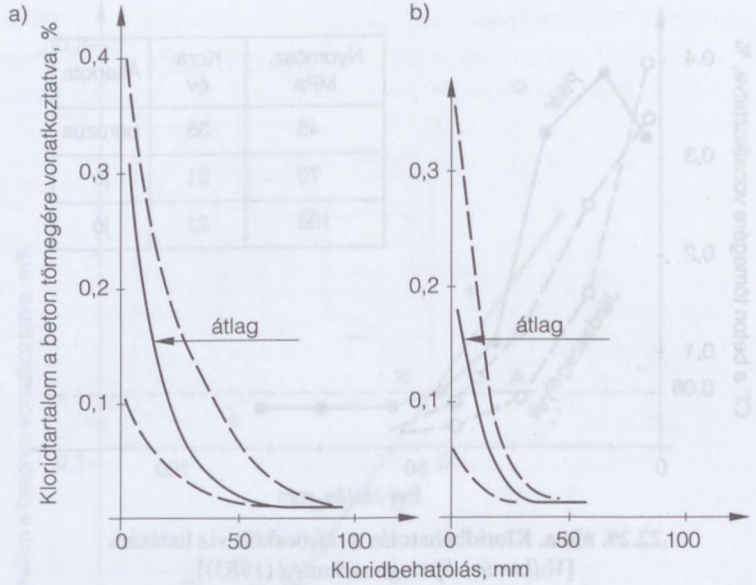
Nyomósz. MPa	Kora év	Állapota
45	35	porózus
70	21	jó
100	21	jó

22.29. ábra. Kloridbehatolás a ráfröcskölt víz hatására
[*Volkwein– Springenschmied* (1983)]



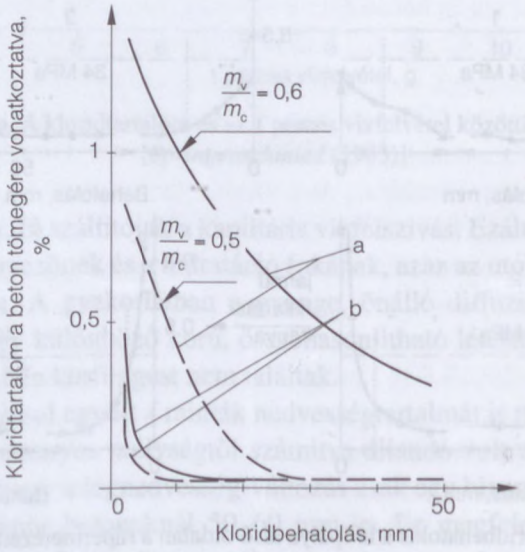


22.30. ábra. Kloridbehatolás a hídpálya alsó oldalán a rápermetezett víz hatására
[*Volkwein–Springenschmied* (1983)]



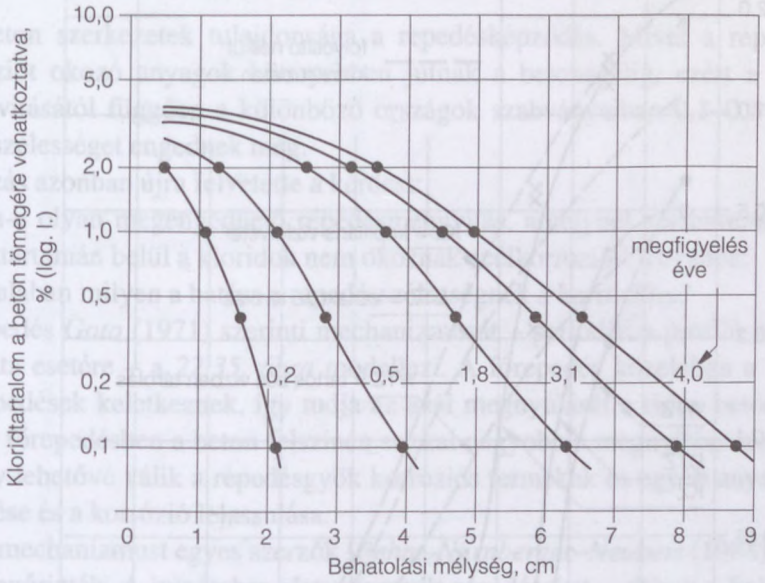
22.31. ábra. Kloridbehatolás 9–46 éves korú autópályahidakba; a) szórt víz; b) szitáló köd

Az a körülmény, hogy a permetező víz és záporeső által el nem ért betonfelületek esetenként jobban átnedvesednek, éppen tavasszal figyelhető meg, amikor a még hideg építmény a levegő felmelegedésével nappal – a páralecsapódás miatt – harmatos.



22.32. ábra. Kloridbehatolás telített NaCl-oldatban való, 8 hónapos tárolás hatására. Víz-cement tényező: 0,6 illetve 0,5; cement PZ 35F; adalékanyag AB8. A próbatestek előzetes tárolása 3 hónapon át; a) 77% relatív légnedvességű térben; b) vízben [*Volkwein* (1987)]

Rehm és *munkatársai* (1988) kísérletileg vizsgálták a kloridbehatolás mélységét. Kapilláris vízfelvétel esetén a behatolás mélysége a vizsgált 4 évig nőtt, de a *22.33. ábra* szerint a behatolás kezdetben sokkal nagyobb volt, mint a 3,0–4 év közötti időben.

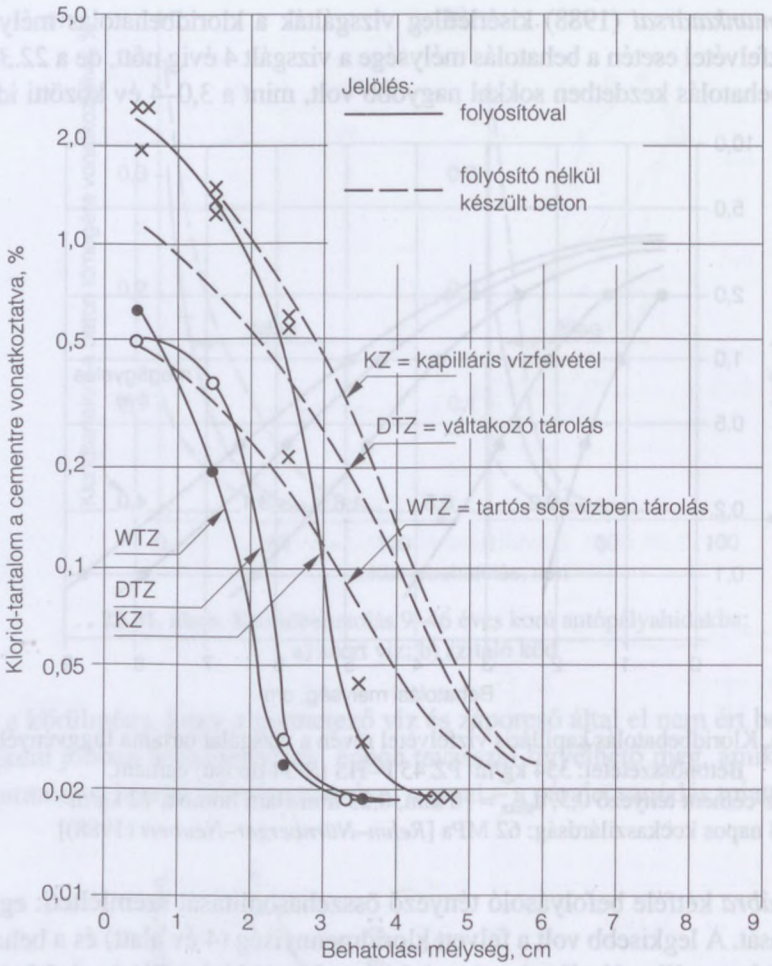


22.33. ábra. Kloridbehatolás kapilláris vízfelvétel révén a vizsgálat tartama függvényében. Betonösszetétel: 354 kg/m³ PZ 45 F–HS (S-54 típusú) cement, víz-cement tényező 0,5, d_{max} = 16 mm, 0,25 mm alatti homok. 72 kg/m³. 28 napos kockaszilárdság: 62 MPa [*Rehm–Nürnberger–Neubert* (1988)]

A *22.34. ábra* kétféle befolyásoló tényező összehasonlítását szemlélteti: egyrészt a tárolás hatását. A legkisebb volt a felvett kloridmennyiség (4 év alatt) és a behatolási mélység, ha a beton állandó sóhatásnak volt kitéve. Nagyobb kapilláris vízfelvétel során. Másrészt a sóbehatolást a folyósítószert tartalmazó betonba a folyósítószer nélküli betonhoz viszonyítva. A vizsgált kocka összetételét a *22.1. táblázat* tartalmazza.

22.1. táblázat. A vizsgált betonok összetétele

Jellemzők	Folyósítószerrel	Folyósítószer nélkül
Cement fajtája	PZ 45 F-HS	(C_3A-szegény)
Cementmennyiség, kg/m³	320	460
d_{max}, mm	16	16
Víz-cement tényező	0,36	0,4
0,25 mm-nél kisebb homok, kg/m³	–	60
Terülés, cm	37	37
28 napos kockaszilárdság, MPa	87	69
Folyósítószer, kg/m³	10	–



22.34. ábra. Kloridbehatolás különböző tárolási mód esetén folyósítószert tartalmazó és anélküli betonba (4 éves vizsgálati időtartam) [*Rehm–Nürnberger–Neubert* (1988)]

Ennek magyarázata abban rejlik, hogy az ionvándorláshoz szükség van a hidrátburokra. Szimbolikusan ezt a *22.25 ábrán* szemléltettük. A tömény oldatokban ez a hidrátburok a molekulaszám-arányok miatt csak csekély mértékben van meg. Ezért a tömény oldatok reakciókészsége a csökkent ionmozgékonyságból adódó kismértékű közvetlen ütközés és a csökkent értékű diffúziós mozgékonyság következtében sokszor kisebb, mint a híg oldatoké. Így a kloridionokkal telített oldatok kapilláraktivitása is csökkent a cementkőben.

Folyósító adalékszerként melamingyanta diszperziót használtak. Az adalékszerrel készített betonban kapilláris vízfelvétel esetén nem változott meg a kloridtartalom a felszín közelében, de lényegesen csökkent a behatolás mélysége.

22.3. A repedések hatása az acélkorrózióra

22.3.1. A repedések hatása a kísérletek szerint

A vasbeton szerkezetek tulajdonsága a repedésképződés. Mivel a repedésekben a korróziót okozó anyagok könnyebben jutnak a betonacélig, ezért a környezet agresszivitásától függően a különböző országok szabványaiban 0,1–0,4 mm max. repedésszélességet engednek meg.

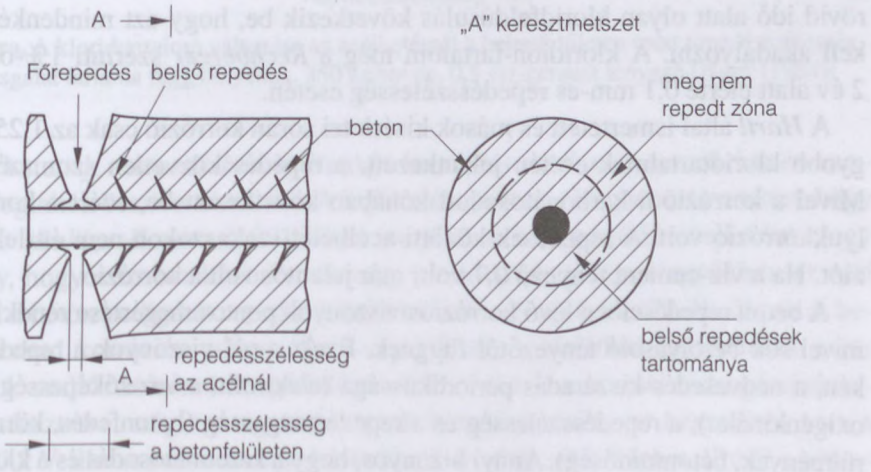
A sózás azonban újra felvetette a kérdést:

– Van-e olyan megengedhető repedésmegnyílás, amelynél a szerkezet tervezett élettartamán belül a kloridok nem okoznak acélkorróziót? Továbbá:

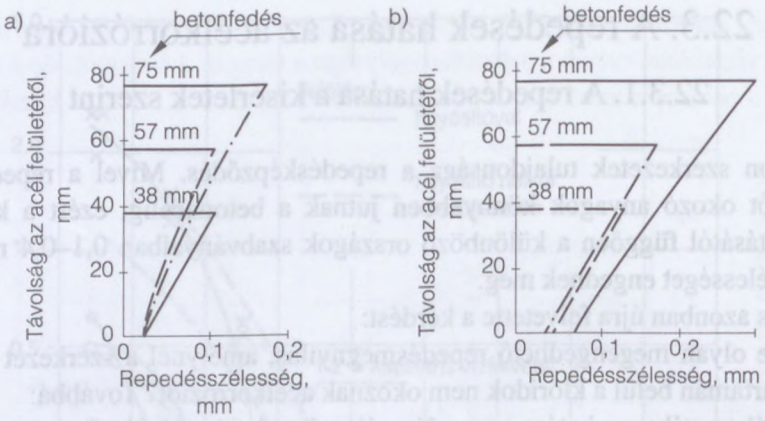
– Általában milyen a hatása a repedésszélességnek a korrózióra?

A repedés *Goto* (1971) szerinti mechanizmusát – periodikus profilú acélbetétek használata esetére – a *22.35. ábra* modellezi. A főrepedés közelében a bordáknál mikrorepedések keletkeznek, így tudja az acél megnyúlását a rideg beton követni. Emiatt a főrepedésben a beton felszínén sokkal nagyobb a megnyílás, mint az acélnál, s így lehetővé válik a repedésgyök korróziós termékek és egyéb anyagok általi eltömődése és a korrózió lelassulása.

Ezt a mechanizmust egyes szerzők [*Rehm–Nürnberger–Neubert* (1988)] kísérlettel is ellenőrizték. A húzóteher alatt megnyílt repedéseket – ebben a helyzetben – kiinjektálták, majd szétfűrészelés után megmérték a repedésszélességeket. A *22.36. ábra* szerint a repedésmegnyílás az acél helyén közelítően független volt a betonfedés vastagságától, míg a beton felszínén annál szélesebb volt, minél nagyobb volt a betonfedés. Ez azonban ellentmondani látszik annak a tapasztalatnak, hogy nagyobb betonfedés nagyobb korrózióvédelmet jelent.



22.35. ábra. A repedésképződés vázlata (erősen felnagyítva) [*Goto* (1971)]



22.36. ábra. Összefüggés az acél, illetve a betonfelületen mért repedésszélességek között kétféle teherre [*Hartl* (1984)]

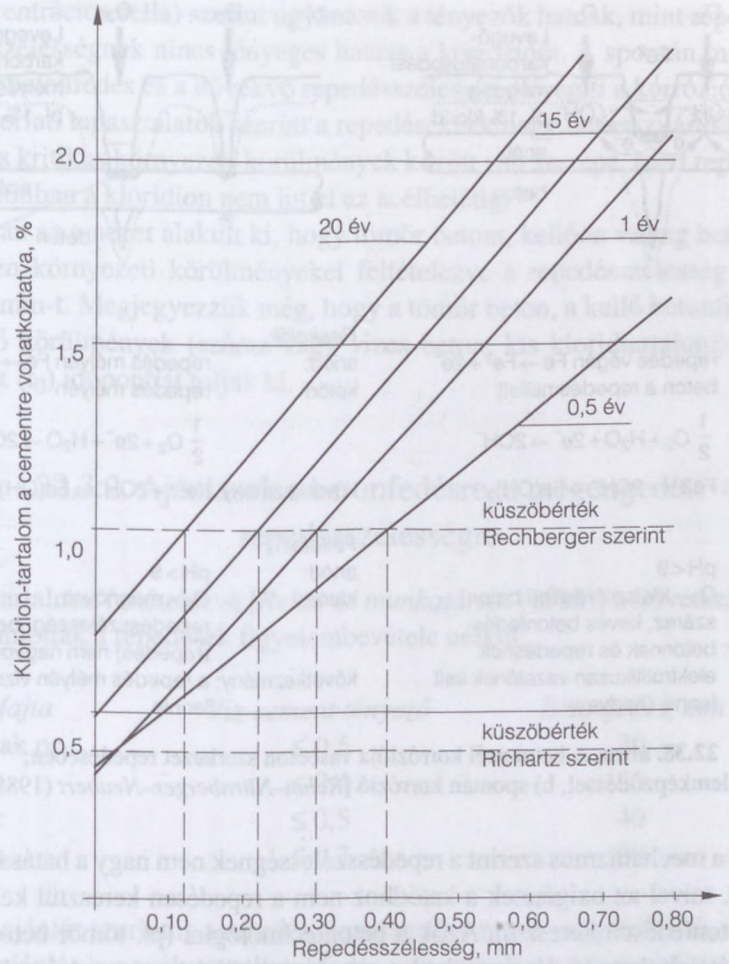
A repedések korróziós hatását úgy szokás vizsgálni, hogy egymással szemben állítanak két azonos vasbetongerendát, és megfelelő erőbevitellel azokon tetszés szerinti megnyílású repedés hozható létre. *Hartl* ilyen kísérletei során az így összefeszített gerendák közül az egyiket 3%-os NaCl oldatba, a másikat vízvezetéki vízbe mártva tárolták, és kéthetenként a gerendapárokat megfordították. A gerendák egy részénél a vízből kiálló részt fóliával letakarták a kiszáradás késleltetésére.

A betonfelülettől 4 cm-re volt a fővasalás. A *22.37. ábra* az ott meghatározott kloridtartalmakat a repedésszélesség és a kor függvényében ábrázolja. Az ábra szerint a kloridtartalom arányos a repedésszélességgel. A kor növekedésével az egyenesek közel párhuzamosan tolódnak el.

A kísérlet azt szemlélteti, hogy igen agresszív kloridhatás esetén, amikor is a sóhatás állandó, és a nedvesedés, illetve a száradás váltakozva fordul elő, viszonylag rövid idő alatt olyan kloridfeldúsulás következik be, hogy azt mindenképpen meg kell akadályozni. A kloridion-tartalom még a *Rechberger* szerinti 1%-os határt is 2 év alatt elérte 0,1 mm-es repedésszélesség esetén.

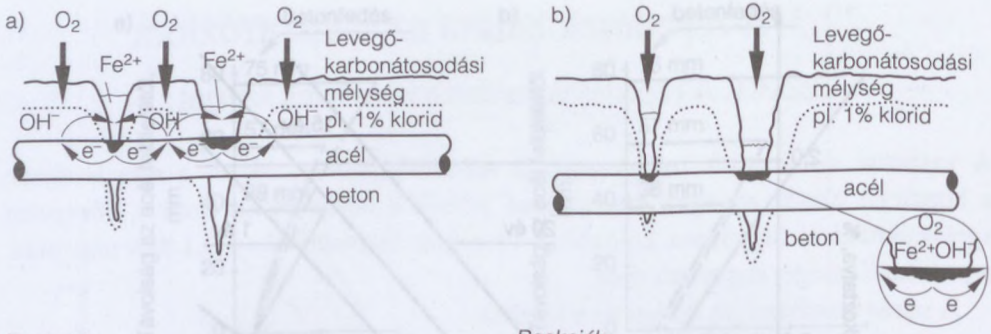
A *Hartl* által ismertetett és mások kísérletei során korrózió csak az 1,25%-nál nagyobb kloridtartalmak esetén jelentkezett, a repedés közvetlen szomszédságában. Mivel a korrózió a karbonátosodott zónában következett be, ezért a korrózió sem lyukkorrózió volt. A repedések közötti acélbetét-szakaszokon nem észleltek korróziót. Ha a víz-cement tényező 0,7 volt, már jelentős volt a korrózió.

A beton repedéseiben lévő korróziós viszonyok pontos megértése rendkívül nehéz, mivel sok befolyásoló tényezőtől függnek. Ezek: a pH-viszonyok a repedés környékén, a nedvesedés-kiszáradás periodikussága (elektrolit, a vezetőképesség változása, oxigénkínálat), a repedésszélesség és a repedésmagasság (betonfedés, környezeti körülmények, betonminőség). Annyi bizonyos, hogy a karbonátosodás és a kloridbehatolás nagyobb a repedés környékén, mint a meg nem repedt betonban.



22.37. ábra. A kloridtartalom változása az acélbetétnél a betonfelületen mért repedésszélesség és a vizsgálat tartama függvényében, 350 kg/m³ pc, 0,5 víz-cement tényező [*Hartl* (1984)]

Sokan kutatták a *repedésben lejátszódó korróziós mechanizmust. Rehm és munkatársai* foglalták össze e nézeteket. A legáltalánosabban elfogadott az a nézet, hogy a korrózió [*Balázs–Kovács* (1991)]-ben ismertetett koncentrációs cellaként megy végbe úgy, hogy a karbonátosodott és/vagy kloridtartalmú repedésgyökben az acél anódként, a beton pedig két repedés között katódként működik (*22.38. ábra*). A betonacél szabad korróziós potenciálja a repedésben a kloridion-tartalomnak és az elektrolitok szellőztetésének megfelelően –0,2…–0,4 V a normál hidrogénelektródára vonatkoztatva, míg a meg nem repedt betonban tiszta pc használata esetén –0,1… + 0,2 V, illetve kohósalak pc használatakor –0,2…0,0 V lehet. Ebből a potenciálkülönbségből adódik a helyi elemképződés.



Reakciók

anód: repedés végén $Fe \rightarrow Fe^2 + 2e^-$

katód: beton a repedésmellett

$$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$$

következmény: $Fe3^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$

Feltétel

anód: $pH < 9$

katód: O_2 – kis szilárdságú beton, száraz, kevés betonfedés

következmény: betonnak és repedésnek elektrolitikusan vezetőnek kell lennie (nedves)

Reakciók

anód: repedés mélyén $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$

katód: repedés mélyén

$$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- + H_2O \rightarrow 2OH^-$$

következmény: $Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$

Feltétel

anód: $pH > 9$

katód: O_2 – megnövelt repedésszélesség, beton (repedés) nem nagyon nedves

következmény: a repedés mélyén víznek kell lennie

22.38. ábra. A betonacél korróziója vasbeton szerkezet repedésében; a) elemképződéssel; b) spontán korrózió [*Rehm–Nürnberger–Neubert* (1988)]

E szerint a mechanizmus szerint a repedésszélességnek nem nagy a hatása a korrózió sebességére, mivel az oxigénnek a katódhoz nem a repedésen keresztül kell bejutnia, hanem a betonfedésen keresztül. Azok a betontechnológiai (pl. tömör beton) és szerkesztési feltételek (betonfedés), amelyek a repedés nélküli betonban elsősorban meghatározzák a korrózió elleni védelmet, repedések esetén is nagy szerepet játszanak.

A megnövekedett korrózió a repedésekben akkor következhet be, ha a betonfedés kicsi, a betonminőség nem felel meg, és a váltakozó nedvesedés, kiszáradás időnként lehetővé teszi mind a beton vezetőképesség-növekedést, mind az oxigénellátást. Ebben az esetben azonban a meg nem repedt betonban is fennáll a korrózió veszélye.

A korrózió fékezésében az is szerepet játszik, hogy a katód és anód tartományának az aránya igen nagy.

Spontán korrózió során feltételezzük, hogy mind az anódos, mind a katódos területek a repedésen belül vannak (*22.38b) ábra*).

Mindkét korrózió mechanizmus esetén előfeltétel az anódos területek aktiválása (a repedésszélek karbonátosodása és/vagy kloridionok a repedésben). Ezenkívül az oxigénnek a katódhoz kell jutnia: elemképződés esetén a betonfedésen, spontán korrózió esetén a repedésen keresztül. Végül a katódok és az anódok közötti tartománynak kellően vezetőképesnek (nedvesnek) kell lennie. Az elemképződési mechaniz-

mus (koncentrációs cella) szerint ugyanazok a tényezők hatnak, mint repedés nélkül, a repedésszélességnek nincs lényeges hatása a korrózióra. A spontán mechanizmus szerint kis betonfedés és a növekvő repedésszélesség elősegíti a korróziót.

A gyakorlati tapasztalatok szerint a repedéseknek nagy betonszilárdság, nagy betonfedés és kritikus környezeti körülmények között van szerepe, mert repedés nélküli ilyen betonban a kloridion nem jut el az acélbetétig.

Általában az a nézet alakult ki, hogy tömör betont, kellően vastag betonfedést és kedvezőtlen környezeti körülményeket feltételezve a repedésszélesség ne haladja meg a 0,3 mm-t. Megjegyezzük még, hogy a tömör beton, a kellő betonfedés, a kedvező külső körülmények (száraz vagy vizes beton, kis kloridtartalom) a korrózió kezdetének (t_0) időpontját tolják ki.

22.3.2. Ajánlások a betonfedésre, a megengedett repedésszélességre

1% kloridtartalmat feltételezve [*Rehm és munkatársai* (1988)] a következő betonfedéseket ajánlották a repedések figyelembevétele nélkül:

Cementfajta	*Víz-cement tényező*	*Betonfedés, mm*
kohósalak pc	$\leq 0{,}5$	20
tiszta pc	$\leq 0{,}4$	20
tiszta pc	$\leq 0{,}5$	40
tiszta pc	$\leq 0{,}7$	60

A CEB-ajánlás szerint is a repedés tágassága 0,4 mm-ig alig befolyásolja a korróziót, de az ajánlás hangsúlyozza betonfedés vastagságának a fontosságát.

A CEB ajánlás az acélokat két korrózióérzékenységi csoportba sorolja:

– igen érzékenyek: idetartozik minden acél Ø4 mm alatt, mindenféle hőkezelt acél és a hidegen alakított acélok 400 MPa fölötti feszültség esetén,
– kevéssé érzékenyek: az összes többi.

A betonfedés javasolt mértéke a *22.2. táblázatban* található a környezeti hatáscsoportok és szilárdsági jelek szerinti bontásban (CEB), illetve *22.3. táblázatban* [*Rehm–Nürnberger–Neubert* (1988)] a megengedett repedéstágasság és víz-cement tényező szerinti bontásban az egykori DIN 1045:1978 szabvány szerint.

A legújabb és igen részletes EUROCODE-2 (2005), MSZ EN 206-1:2002, illetve MSZ 4798-1:2004 előírásait a *22.4.–22.6. táblázat* tartalmazza. Ezekben a betontechnológiai tényezők és rendszabályok is szerepelnek az ENV 206 (1988. évi tervezet) Betonelőírás szerint.

A *22.6. táblázat*ban a minimális betonfedést adták meg, amelyet a kedvezőtlen méreteltérések miatt egy Δc_{dev} értékkel növelni kell.

22.2. táblázat. Kevéssé érzékeny acélok fölötti minimális betonfedés a CEB-ajánlás (1985) szerint (mm)

Környezet	C20-ig		C20 fölött C40-ig		C40 és fölötte	
	a beton szilárdsági jele					
	általános	lemez	általános	lemez	általános	lemez
1	20	15	15	15	15	15
2a	30	25	25	20	20	15
2b	35	30	30	25	25	20
3	–	–	35	30	30	25
4			35	30	30	30

22.3. táblázat. Megengedett repedésszélesség

Korróziós osztály DIN 1045:1978 (10. táblázat szerint)	Legkisebb betonfedés, cm	Víz-cement tényező	Megengedett repedésszélesség, mm (a betonfelületen)
1	2	≤ 0,7	0,5
2	2,5	≤ 0,6	0,4
3	3	≤ 0,55	0,4
4	4	≤ 0,60	0,3

22.3.3. Összefoglalás

Karbonátosodott betonban a kloridion nem kötődik meg, tehát a minimális kloridion is korróziót okozhat. Még alkálikus környezetben (pH > 9) is nő a korróziós veszély a kloridion nélküli betonhoz képest. A korróziót az is elősegíti, hogy a kloridtartalmú beton vezetőképessége megnő, részben nagyobb higroszkópossága miatt.

A kloridion behatolása mélységét a cementfajta, a víz-cement tényező (adalékszer), a betonfedés vastagsága és az utókezelés mértéke, azaz együttesen a beton porozitása döntően befolyásolja.

A betonba a só felszíni víz, szivárgó víz, szórt víz és szitáló köd közvetítésével jut be, és a behatolás ebben a sorrendben csökken. Kapilláris vízfelszívással juthat legtöbb klorid a váltakozóan nedves és kiszáradó betonba.

A repedésben végbemenő korrózió mechanizmusára leginkább az a nézet elfogadott, hogy a repedés gyökében az acél anódként, a két repedés között a beton katódként viselkedik. Ezért van jelentősége ebből a szempontból is a beton tömörségének és a betonfedés vastagságának. A megengedhető repedésszélesség a környezet agresszivitásától függ. A követendő betontechnológiai rendszabályokat európai és magyar előírások tárgyalják.

Az MSZ/EN 206-1:2002 szabvány szerinti környezeti osztályokat a *22.4.–22.6. táblázat* szemléleti.

22.4. táblázat. Környezeti osztályok az MSZ EN 206-1:2002 szabvány szerint

Az osztály jele	A környezeti hatás leírása	Tájékoztató példák a 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.	Nagyon csekély 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. MEGJEGYZÉS: A nedvességviszonyok az acélbetéteket vagy más beágyazott fémeket takaró betonfedésre vonatkoznak, de sok esetben fel lehet tételezni, hogy a betonfedésben lévő körülmények a környezetet tükrözik. Ezekben az esetekben helyénvaló lehet a környezet osztályozása. Nem ez az eset akkor, amikor a beton és a környezet között elválasztó réteg van.		
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.		
XD1	Mérsékelt nedvesség	A levegőből származó kloridnak kitett beton.
XD2	Nedves, ritkán száraz	Úszómedencék. Kloridot tartalmazó ipari vizeknek kitett
XD3	Váltakozva nedves és száraz	Kloridot tartalmazó permetnek kitett hídelemek. Járdák és útburkolatok. Autóparkolók födémei.

22.4. táblázat (folyt.) Környezeti osztályok az MSZ EN 206-1:2002 szabvány szerint

Az osztály jele	A környezeti hatás leírása	Tájékoztató példák a környezeti osztályok előfordulására
4. Tengervízből származó klorid által okozott korrózió		
Amikor a vasbeton vagy más beágyazott fémet tartalmazó beton tengervízből származó kloridnak vagy tengervízből származó sót tartalmazó levegőnek van kitéve, akkor a kitételt a következők szerint kell osztályozni		
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	Árapállyal, felcsapódással vagy permettel érintkező zónák	Tengervízben épült szerkezetek részei.
5. Fagyási/olvadási korrózió jégolvasztó anyaggal vagy anélkül		
Amikor a beton a fagyási/olvadási ciklusok által okozott jelentős igénybevételnek van kitéve nedves állapotban, akkor az igénybevételt a következőképpen kell osztályozni:		
XF1	Mérsékelt víztelítettség jégolvasztó anyag nélkül.	Függőleges betonfelületek esőnek és fagynak kitéve
XF2	Mérsékelt víztelítettség jégolvasztó anyaggal.	Útépítési szerkezetek függőleges betonfelületei, amelyek ki vannak téve fagynak és a levegő által szállított jégolvasztó anyag permetének.
XF3	Nagymértékű víztelítettség jégolvasztó anyag nélkül.	Esőnek és fagynak kitett vízszintes betonfelületek.
XF4	Nagymértékű víztelítettség jégolvasztó anyaggal vagy tengervízzel.	Útburkolatok és hídpályalemezek jégolvasztó anyagoknak kitéve. Jégtelenítő anyagok közvetlen permetének és fagynak kitett betonfelületek. Fagynak kitett tengeri szerkezetek a felcsapódási zónában.

22.4. táblázat (folyt.) Környezeti osztályok az MSZ EN 206-1:2002 szabvány szerint

Az osztály jele	A környezeti hatás leírása	Tájékoztató példák a környezeti osztályok előfordulására
6. Kémiai korrózió		
Amikor a beton ki van téve a természetes talajból és talajvízből származó anyagok kémiai korróziójának, ahogyan azt a 22.5. táblázat részletezi, akkor az igénybevételt a következők szerint kell osztályozni. A tengervíz osztályozása a földrajzi helyzettől függ, ezért a betonok felhasználási helyén érvényes osztályozást alkalmazzák. MEGJEGYZÉS: Egyedi vizsgálatok szükségesek az érvényes igénybevételi feltételekre akkor, ha – a határok a 22.5. táblázaton kívül esnek; – az agresszív vegyi anyagok mások; – a talaj vagy a talajvíz kémiailag szennyezett; – a 22.5. táblázat szerinti vegyi anyagok esetén nagy vízáramlási sebesség van.		
XA1	Enyhén agresszív kémiai környezet a 22.5. táblázat szerint	
XA2	Mérsékelten agresszív kémiai környezet a 22.5. táblázat szerint	
XA3	Nagymértékben agresszív kémiai környezet a 22.5. táblázat szerint	

22.5. táblázat. Beton környezeti osztályai az MSZ 4798-1:2004 szabvány alapján [*Kausay* (2009)]

Alkalmazási terület	Környezeti osztály jele	Beton nyomószilárdsági osztálya, legalább	Beton cementtartalma legalább kg/m³	Beton víz-cement tényezője, legfeljebb	Friss beton levegőtartalma, legfeljebb, térfogat%
Környezeti hatásoknak ellen nem álló, azoknak ki nem tett betonszerkezetek					
Környezeti hatásoknak (nedvesség, karbonátosodás, kloridhatás, fagyás/olvadás, kémiai korrózió, koptatóhatás vagy víznyomás) nem ellenálló beton	XN(H)	C8/10	(165)[2)]	(0,90)[2)]	(2,5)[2)]
	A beton szilárdsági szempontból alárendelt jelentőségű Például: Aljzatbeton, beton alapréteg, cementstabilizáció				
	X0b(H)	C12/15	(230)[2)]	(0,75)[2)]	(2,0)[2)]
	Például: Vasalatlan alapbeton, kitöltő és kiegyenlítő beton, üreges födémbéléstest, üreges válaszfallap, üreges zsaluzóelem, kétrétegű járdalap hátbetonja, kétrétegű útburkolóelem hátbetonja, üreges pince-falazóelem, belső főfali üreges főfal-falazóelem, belső főfali tömör főfal-falazóelem				
Környezeti hatásoknak ellen nem álló, azoknak ki nem tett vasbeton szerkezetek					
Környezeti hatásoknak nem ellenálló vasbeton, legfeljebb 35% relatív páratartalmú vagy levegőtől elzárt, száraz helyen lévő vasbeton	X0v(H)	C20/25*	(250)[2)]	(0,70)[2)]	(2,0)[2)]
	*Megjegyzés: Az MSZ EN 206-1:2002 és MSZ 4798-1:2004 szabvány szerint C20/25 nyomószilárdsági osztályúnál gyengébb betonból vasbetont készíteni nem szabad. Például: Vasalt alapbeton				
Karbonátosodásnak ellenálló beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek					
Száraz vagy tartósan nedves helyen, állandóan víz alatt	XC1	C20/25	260	0,65	2,0
	Például: Belső pillér, belső födém				
Nedves, ritkán száraz helyen	XC2	C25/30	280	0,60	2,0
	Például: Épületalap, támfalalap, mélyalap, kiegyenlítő lemez.				
Mérsékelten nedves helyen, nagy relatív páratartalmú épületben vagy a szabadban, esőtől védett helyen	XC3	C30/37	280	0,55	2,0
	Például: Fürdőépület szerkezete.				
Váltakozva nedves és száraz, víznek kitett helyen	XC4	C30/37	300	0,50	2,0
	Például: Szárnyfal, pincefal, fúrt cölöp, cölöp-fejgerenda				
Kloridoknak ellenálló beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek					
Mérsékelten nedves helyen, levegőből származó kloridoknak kitett, de jégolvasztó sóknak ki nem tett, korrózióálló beton	XD1	C30/37	300	0,55	2,0
	Például: Vegyipari üzemek környezetében, a szabadban lévő szerkezetek.				

22.5. táblázat (folyt.) Beton környezeti osztályai az MSZ 4798-1:2004 szabvány alapján [*Kausay* (2009)]

Alkalmazási terület	Környezeti osztály jele	Beton nyomószilárdsági osztálya, legalább	Beton cementtartalma legalább kg/m³	Beton víz-cement tényezője, legfeljebb	Friss beton levegőtartalma, legfeljebb, térfogat%
Nedves, ritkán száraz helyen, vízben lévő kloridoknak kitett, de jégolvasztó sóknak ki nem tett, korrózióálló beton	XD2	C30/37	300	0,55	2,0
	Például: Alépítmény, szárnyfal, kloridtartalmú talajvízzel vagy ipari vízzel érintkező építmény, medence, úszómedence.				
Váltakozva nedves és száraz helyen, jégolvasztó kloridok permetének kitett korrózióálló beton	XDC3	C35/45	320	0,45	2,0
	Magyarországon a fagy/olvadási ciklusoknak és jégolvasztó sóknak kitett betonokat az XD3 környezeti osztály helyett az XF4 környezeti osztályba kell sorolni. Például: Hídelemek, járdák, parkolóházak és garázsok burkolata.				
Függőleges felületű fagyálló beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek					
Függőleges felületű, mérsékelt víztelítettségű, esőnek és fagynak kitett, olvasztó sózás nélküli fagyálló beton	XF1	C30/37	300	0,55	1,5
	Légbuborékképző adalékszer nélkül készül a beton. Például: Monolit és előregyártott szerkezetek.				
Függőleges felületű, mérsékelt víztelítettségű, fagynak és jégolvasztó sók permetének kitett fagyálló beton	XF2	C25/30	300	0,55	4,0–8,0
	Légbuborékképző adalékszerrel készül a beton. Az összes levegőtartalom megengedett legnagyobb értéke a friss betonban = a fagy- és olvasztósóálló betonra előírt legkisebb érték (4,0 térfogat%) + max 4,0 térfogat% Például: Útépítési szerkezetek.				
Függőleges felületű, mérsékelt víztelítettségű, fagynak és jégolvasztó sók permetének kitett fagyálló beton	XF2(BV-MI)	C35/40	320	0,50	1,0
	Légbuborékképző adalékszer nélkül készül a beton. Például: Monolit és előre gyártott szerkezetek. Alkalmazása út- és repülőtéri burkolatok, híd pályalemezek esetén tilos!				
Vízszintes felületű fagyálló beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek					
Vízszintes felületű, nagy víztelítettségű, esőnek és fagynak kitett, olvasztó sózás nélküli fagyálló beton	XF3	C30/37	320	0,50	4,0–8,0
	Légbuborékképző adalékszerrel készül a beton. Az összes levegőtartalom megengedett legnagyobb értéke a friss betonban = a fagy- és olvasztósóálló betonra előírt legkisebb érték (4,0 térfogat%) + max 4,0 térfogat% Például: Útépítési szerkezetek, híd pályalemezek.				
Vízszintes felületű fagyálló beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek					
Vízszintes felületű, nagy víztelítettségű, esőnek és fagynak kitett, olvasztó sózás nélküli fagyálló beton	XF32(BV-MI)	C35/45	320	0,50	1,0
	Légbuborékképző adalékszer nélkül készül a beton. Például: Monolit és előre gyártott szerkezetek. Alkalmazása út- és repülőtéri burkolatok, híd pályalemezek esetén tilos!				

22.5. táblázat (folyt.) Beton környezeti osztályai az MSZ 4798-1:2004 szabvány alapján [*Kausay* (2009)]

Alkalmazási terület	Környezeti osztály jele	Beton nyomószilárdsági osztálya, legalább	Beton cementtartalma legalább kg/m³	Beton víz-cement tényezője, legfeljebb	Friss beton levegőtartalma, legfeljebb, térfogat%
Vízszintes felületű, nagy víztelítettségű, esőnek és fagynak kitett, olvasztó sózás nélküli fagyálló beton	XF4	C30/37	340	0,45	4,0–8,0
	Légbuborékképző adalékszerrel készül a beton. Az összes levegőtartalom megengedett legnagyobb értéke a friss betonban = a fagy- és olvasztósóálló betonra előírt legkisebb érték (4,0 térfogat%) + max 4,0 térfogat% Például: Útpályabeton, repülőtéri kifutópálya, híd pályalemezek.				
Talaj és talajvíz kémiai korróziójának ellenálló beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek					
Agresszív talajjal vagy talajvízzel érintkező, enyhén korrózióálló beton	XA1	C30/37	300	0,55	2,0
	Bármely MSZ EN 197-1:2000 szerinti CEM II fajtájú kohósalak-portlandcement Például: Fúrt cölöp				
Agresszív talajjal vagy talajvízzel érintkező, mérsékelten korrózió- és szulfátálló beton	XA2	C30/37	320	0,50	2,0
	MSZ 4737-1:2002 szerinti CEM I vagy CEM II fajtájú MS jelű mérsékelten szulfátálló vagy S jelű szulfátálló portlandcement vagy CEM III/A fajtájú MS jelű kohósalakcement vagy CEM III/B szulfátálló kohósalakcement. Például: Fúrt cölöp.				
Agresszív talajjal vagy talajvízzel érintkező, erősen korrózió és szulfátálló beton	XA3	C35/45	360	0,45	2,0
	MSZ 4737-1:2002 szerinti CEM I vagy CEM II fajtájú S jelű szulfátálló portlandcement vagy CEM III/B fajtájú szulfátálló kohósalakcement Például: Fúrt cölöp, agresszív anyagok tárolótere.				
Kopásálló beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek					
Mérsékelten kopásálló, k14/21 jelű kavics- vagy zúzottkő	XK1(H)	C30/37	310	0,50	2,0
	Például: Siló, bunker, tartály könnyű anyagok tárolására, garázspadozat, lépcső, járólap, kopásálló réteggel ellátott ipari padlóburkolat kopásálló réteg nélkül.				
Kopásálló, k12/18 jelű zúzottkőbeton	XK2(H)	C35/45	330	0,45	2,0
	Például: Nehéz anyagok tárolója, gördülő hordalékkal érintkező beton, egyrétegű járdalap és monolit járda, kétrétegű járdalap kopórétege, közönséges útszegélyelem, lépcső, vasbeton lépcső, aknafedlap.				
Kopásálló beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek					
Fokozottan kopásálló, k10/15 jelű zúzottkőbeton	XK3(H)	C40/50	350	0,40	2,0
	Például: Egyrétegű útburkolóelem, kétrétegű útburkolóelem kopórétege, kopásálló útszegélyelem, vasalatlan útpályaburkolat, repülőtéri pályaburkolat, konténer átrakó állomás térburkolata.				
Igen kopásálló, k8/12 jelű zúzottkőbeton	XK4(H)	C45/50	330	0,35	2,0
	Például: Ipari padlóburkolat, amelyre nem kerül kopóréteg.				

22.5. táblázat (folyt.) Beton környezeti osztályai az MSZ 4798-1:2004 szabvány alapján [*Kausay* (2009)]

Alkalmazási terület	Környezeti osztály jele	Beton nyomószilárdsági osztálya, legalább	Beton cementtartalma legalább kg/m³	Beton víz-cement tényezője, legfeljebb	Friss beton levegőtartalma, legfeljebb, térfogat%
Különlegesen kopásálló, k6/9 jelű zúzottkőbeton	XK5(H)	C50/60	390	0,35	1,0
	Például: Vibropréselt térburkolóelem.				
Vízzáró beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek					
VZ60 jelű vízzáró beton	XV1(H)	C25/30	300	0,60	1,0
	Például: Pincefal, csatornafal, mélyalap, áteresz, folyóka, surrantóelem, mederlap, mederburkolóelem, rézsűburkolat, legfeljebb 1 m magas víztároló medence, záportározó, esővízgyűjtő akna				
VZ40 jelű fokozottan vízzáró beton	XV2(H)	C30/37	300	0,55	1,0
	Például: Vízépítési szerkezetek, gátak, partfalak, 1 m-nél magasabb víztároló medence, földalatti garázs, aluljáró külön szigetelőréteg nélkül, földalatti alaptestek, kiegyenlítő lemezek				
VZ20 jelű igen vízzáró beton	XK5(H)	C50/60	390	0,35	1,0
	Például: Mélygarázs, mélyraktár, alagút külön szigetelőréteg nélkül.				
MEGJEGYZÉS:	[1] A friss beton levegőtartalma feszített vasbeton esetén a táblázatban szereplő értékeknél 0,5 térfogat%-kal legyen kisebb. Ha a beton újrahasznosított adalékanyaggal készül, akkor a levegőtartalom a táblázatban szereplő értékeknél 0,5 térfogat%-kal nagyobb lehet. [2] Ajánlott érték				

22.4. A korróziót kiváltó kritikus kloridtartalom

22.4.1. A korróziót kiváltó kritikus kloridtartalom fogalma

A cél annak a meghatározása, hogy mikor okoz korróziót a betonba jutott kloridion. A kutatások két irányban folynak:

1. A korróziót kiváltó kritikus kloridtartalom meghatározása.
2. A cement által megkötött kloridtartalom meghatározása.

Előbbit a vonatkozó ismeretekkel *Breit* (1997) foglalta össze. Ezt ismertetjük röviden.

Az a tény, hogy a vasalás korróziója egy kritikus kloridkoncentráció felett lép fel, a korróziót kiváltó kritikus kloridtartalmat a korrózió szempontjából kitüntetett jelentőségűvé teszi. A vasalás korróziója csak akkor jön létre, ha a kívülről betonba kerülő kloridion mennyisége a vasalás helyén egy kritikus határértéket túllép. Ahhoz, hogy ez bekövetkezzék, a külső feltételeken kívül azoknak a betontechnológiai paramétereknek van szerepe, amelyek a kloridok betonba jutását elősegítik (pl. kapilláris porozitás). Az acélbetétig hatoló a kloriddiffúzió időpontját és az acélbetét felületén a de-

22.6. táblázat. MSZ 4798-1:2004 szabvány – az MSZ EN 1992-1-1:2005 Eurocode 2 figyelembevételével – módosított NAD I1. táblázata:
A betonfedés szükséges mértéke szokványos szerkezet esetén, ha a szerkezet tervezett használati élettartama 50 év

Környezeti osztály	Legkisebb betonfedés[c] c_{min} mm		Kötelező ráhagyás[d] Δc_{dev}, mm
	Betonacél	Feszítőbetét	
X0	10 [a]	10 [b]	10
XC1	15 [a]	25 [b]	10
XC2–XC3	25 [a]	35 [b]	15
XC4	30 [a]	40 [b]	15
XD1, XS1, XA1, XV1(H)	35 [a]	45 [b]	15
XD2, XS2, XA2, XV2(H)	40 [a]	50 [b]	15
XD3, XS3, XA3, XV3(H)	45 [a]	55 [b]	15
XF1	30 [a]	40 [b]	15
XF2–XF3	35 [a]	45 [b]	15
XF4	40 [a]	50 [b]	15
XK1(H)–XK4(H)	50 [a]	60 [b]	15

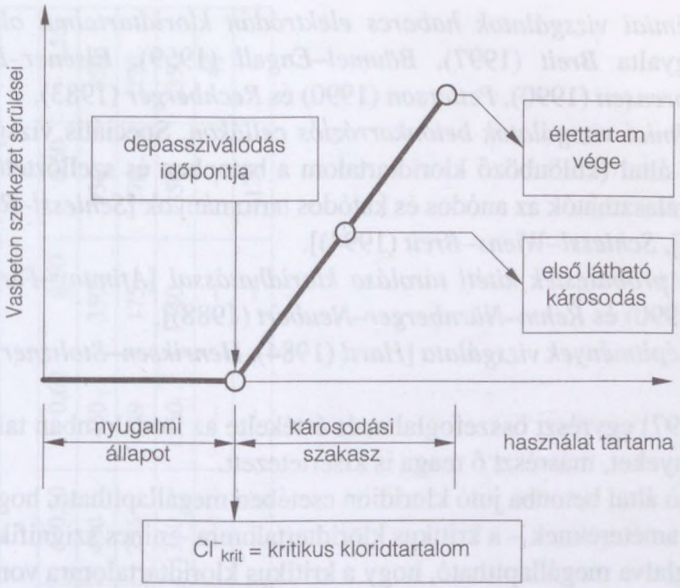
A névleges betonfedés (c_{nom}) az előírt legkisebb betonfedésnek (c_{min}) a Δc_{dev} kötelező ráhagyással megnövelt értéke: $c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$. A szerkezeti terveken a névleges betonfedés c_{nom} [mm] értékeit kell bejelölni. Ha névleges betonfedés értéke $c_{nom} > 40$ mm, akkor a betonfedésbe erősítő műanyaghálót kell szerelni.

passziválódást, valamint a korróziót mint időbeli folyamatot elvileg a *22.39. ábra* szemlélteti. Egy nyugalmi időszak után az acélbetét mellett eléri a kloridtartalom a kritikus értéket, és a korrózió kezdetét veszi. A korrózió előbb látható lesz, majd a vasbeton szerkezet a tervezettnél korábban eljut élettartamának végéhez.

Schiessl és *Raupach* (1990) szerint – a gyakorlati feltételek között – a *kritikus kloridtartalomra* két definíció lehetséges.

1. Kritikus az a kloridtartalom, amelynél az acélbetét felületén a depassziválódás fellép és megkezdődik a vas oldódása, függetlenül attól, hogy a betonfelületen a rozsdásodás látható-e.
2. Kritikus az a kloridtartalom, amelyik szerint a károsodás a korrózió megjelenéséhez vezet.

Az 1. definíció szerint laborkísérletekkel jellemezzük a kritikus kloridtartalom szokásos időpontját. Ennél eltérések adódhatnak a kísérlet felépítése, a méréstechnikai eljárás, a kémiai elemzések módszere miatt. Nem mindegyik alkalmas arra, hogy a depassziválódás egzakt időpontját megadja. A 2. definíció szerint nagyobb kloridkoncentráció adódik, mint 1. definíció alkalmazásakor, ha a korrózió csak azután lép fel, amikor a depassziválódás mellett további feltételek teljesülnek, amelyek nagyobb korróziós sebességet eredményeznek, például elegendő oxigén, megfelelő nedvességviszonyok.



22.39. ábra. A sérülés foka a szerkezet használati idejének függvényében
A sérülés foka a szerkezet használati idejének függvényében [*Schiessl–Breit–Raupach* (1996)]

A kritikus kloridtartalommal összefüggésben az irodalomban felmerült a korróziót kiváltó, valamint a károsodást kiváltó kloridtartalom. Összességében nincs egyértelmű definíció, amely alapján a kritikus határértéket meg lehetne kapni.

A választott kísérleti eljárás mellett különös szerephez jut a kloridtartalom meghatározásának módja [*Erlin–Verbeck* (1975)]. Ezek az összes kloridtartalom, vagy a szabad, le nem kötött kloridkoncentráció meghatározásán alapulnak. Ennek megfelelően a kritikus kloridtartalom a következő lehet:

– A betonra vagy cementre vonatkoztatott összes kloridtartalom, m%;
– Szabad kloridkoncentráció, m%;
– A kritikus szabad kloridtartalom leírására a $[Cl^-]/[OH^-]$ viszony is alkalmas lehet, mivel a korróziót kiváltó szabad kloridtartalom és a hidrogénion-koncentráció között törvényszerűség áll fenn.

A kloridtartalom meghatározásának módszereit *Balázs–Kovács* (1991) foglalták össze.

22.4.2. A vizsgálati módszerek és eredményeik

A nemzetközi irodalomban az acélbetét-korrózió vizsgálatának számos módszerét és eredményét találjuk meg. Ezekből néhány példa:

Az acél elektrokémiai vizsgálata kloridtartalmú alkálikus oldatokban. E témakörrel (kritikus korróziót kiváltó kloridtartalommal) *Breit* (1997), *Bäumel–Engell* (1959), *Gouda* (1970), *Hausman* (1967) és *Rechberger* (1980) foglakozott.

Elektrokémiai vizsgálatok habarcs elektródán kloridtartalmú oldatban. E témakört tárgyalta *Breit* (1997), *Bäumel–Engell* (1959), *Elsener–Böhni* (1985), *Hansson–Sorensen* (1990), *Petterson* (1990) és *Rechberger* (1983).

Elektrokémiai vizsgálatok betonkorróziós cellákon. Speciális vizsgálati felépítés koncepciója által (különböző kloridtartalom a betonban és szellőztetési viszonyok) tisztán szétválaszthatók az anódos és katódos tartományok [*Schiessl–Raupach* (1988, 1990, 1992)], *Schiessl–Wiens–Breit* (1994)].

Vasbeton próbatestek kitéti tárolása kloridhatással [*Atimtay–Ferguson* (1974), *Petterson* (1990) és *Rehm–Nürnberger–Neubert* (1988)].

Meglévő építmények vizsgálata [*Hartl* (1984), *Henriksen–Stoltzner* (1993), *Lukas* (1983)].

Breit (1997) egyrészt összefoglalta, és értékelte az irodalomban található vizsgálati eredményeket, másrészt ő maga is kísérletezett.

A diffúzió által betonba jutó kloridion esetében megállapítható, hogy a betontechnológiai paramétereknek – a kritikus kloridtartalomra – nincs szignifikáns befolyása.

Összefoglalva megállapítható, hogy a kritikus kloridtartalomra vonatkozó állítást mindig az alkalmazott vizsgálati módszerre és a kloridtartalom meghatározási eljárásra kell vonatkoztatni. Az eredmény megítélésénél segít a korrózióaktív felületek feltárása.

A beton összes kloridtartalmának a meghatározása a furatliszt savas feltárásával és azt követő potenciometrikus ezüst-nitrát oldatos titrálással egyszerű és pontos eljárás. Korróziót azonban a pórusvízben lévő, le nem kötött kloridion okoz. A pórusvíz-sajtolásos eljárás nem tekinthető elég pontosnak.

Ezért az irodalom kiértékelése alapján az állítható, hogy az alsó kritikus, korróziót kiváltó kloridtartalom kb. 0,2 m% volt a cementre vonatkoztatva. Ezzel az állítással szemben áll az, hogy kimutattak 1,7 m%-ot is.

Továbbiakban ismertetjük *Breit* (1997) elektrokémiai vizsgálatait. A habarcsok összetételét a *22.7. táblázat* szemlélteti.

Az eredményeket a *22.40. ábrában* foglalták össze. Az ábrából az látható, hogy a kísérleti feltételek között a lyukkorrózió kezdete 0,25 és 0,75 m% összes kloridtartalom között van. A vizsgált keverékekre a kritikus korróziót kiváltó kloridtartalom 0,35 és 0,50 m% között adódott. Kivétel csak a 6. és 11. jelű volt, amelynél 15%-nál kisebb lett a szórási tartomány. Jelentős eredménynek tekintették azt, hogy 0,25 m% alatt – a vizsgált habarcsokban – nem lépett fel korrózió. A hozzá tartozó szabad kritikus korróziót kiváltó kloridtartalom 0,12 m% a cementre vonatkoztatva, ami $c(Cl^-) = 0{,}1$ mol/ℓ-nek felel meg.

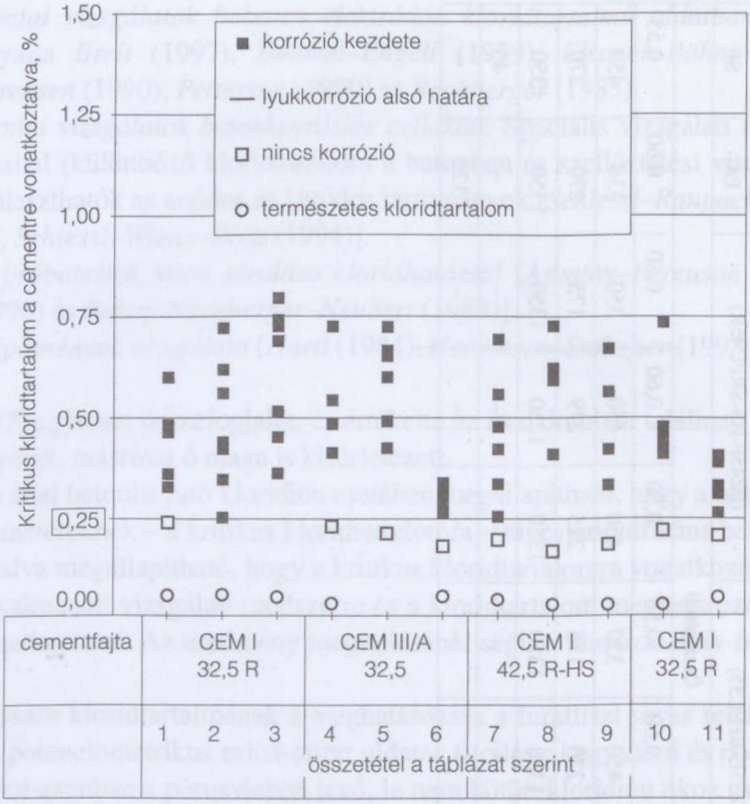
A kísérlet bebizonyította – egybevágóan *Petterson* (1990), *Hanson* és *Sorensen* (1990) kísérleti eredményeivel –, hogy a kritikus kloridtartalomra nincs jelentős befolyása sem a cementfajtának, sem a cementtartalomnak, sem a víz-cement tényezőnek.

Az ismertetett kutatások szerint a kritikus korróziót kiváltó kloridtartalom nem definiálható egy konstans értékkel. Másrészt a lyukkorrózió kezdetére, amely azo-

22.7. táblázat. A habarcsok összetétele Breit kísérletében (1997)

Jellemző	Dimenzió	Cementfajta										
		CEM I 32,5 R (PZ35F-OPC35R)			CEM III/A 32,5 (HOZ35L-BFSC35)			CEM I 42,5 R-S (PZ45F-HS-SRPC45R)			CEM I 32,5R	
											FA	SF
		Összetétel[1]										
m_w/m_c	kg/m³	0,50	0,60	0,50	0,50	0,60	0,50	0,50	0,60	0,50	0,60	0,55
cement		450	450	350	450	450	350	450	450	350	330	450
víz		225	270	175	225	270	175	225	279	175	270	270
adalék		1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
szilikapor		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	45
pernye		–	–	–	–	–	–	–	–	–	120	–

[1] Az összetétel DIN EN 196-1 szerint.



22.40. ábra. A korróziót kiváltó összes kloridtartalom a cemenfajta és a habarcsösszetétel függvényében [*Breit* (1997)]

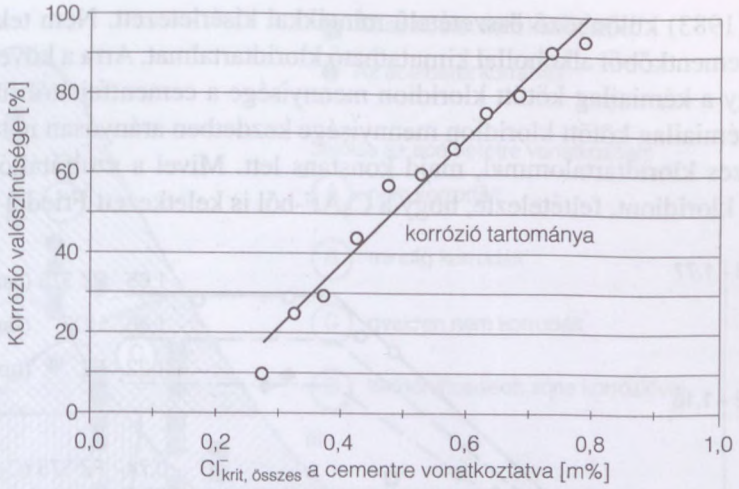
nosnak tekinthető a kritikus korróziót kiváltó kloridtartalom átlépésével, a kloridion-koncentrációnak határozott értéktartománya adódik, amely független a betontechnológiai paraméterektől.

Annak a valószínűsége, hogy a 0,25–0,30 m% alsó határérték túllépése bekövetkezik, 10%. Növekvő kloridtartalommal a korróziós kockázat 0,75% felső határig lineárisan nő (*22.41. ábra*). A cementre vonatkoztatott kb. 0,85 m% összes kloridtartalom (az acél felületén) felületi korrózióhoz vezet.

22.5. A beton kloridion-megkötő képessége

22.5.1. A kloridkötésről az irodalom alapján

A múlt század első felében az volt a probléma, hogy a betonba a készítéskor bekevert kalcium-klorid okoz-e korróziót. Azt már a múlt század elejétől tudjuk, hogy a cement C_3A-tartalma a kalcium-kloridot megkötheti Friedel-só formájában:



22.41. ábra. A lyukkorrózió kezdetének valószínűsége [*Breit* (1997)]

$C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Friedel-só).

Ezt a kötési mechanizmust az előző fejezetben ismertetett kísérletek is igazolták. A kutatók feladata abban az időben az volt, hogy a befolyásoló tényezőket megállapítsák.

A múlt század hatvanas éveiben megkezdődött a közutak téli sózása, ezzel új helyzet állt elő:

A betonra nem a $CaCl_2$, hanem a NaCl hatott.

A téli sózás a hidak forgalomba helyezése után kezdődik, amikor a beton legalább 28 napos, és ekkorra a klinkeralkotók hidrátokká alakulnak át. Friedel-só csak akkor keletkezik, ha valamelyik hidrát elbomlik.

Volkwein (1982) következő mechanizmust tételezte fel 22 éves hidak vizsgálata alapján:

$$3[C_3(A/F) \cdot CaSO_4 \cdot H_{12}] + 2Ca(OH)_2 + 4NaCl + 16H \rightarrow$$

monoszulfát mész konyhasó víz

$$2[C_3(A/F) \cdot CaCl_2 \cdot H_{10}] + C3(A/F) \cdot 3CaSO_4 + 4NaOH$$

Friedel-só ettringit alkáli-hidroxid

E képlet szerint

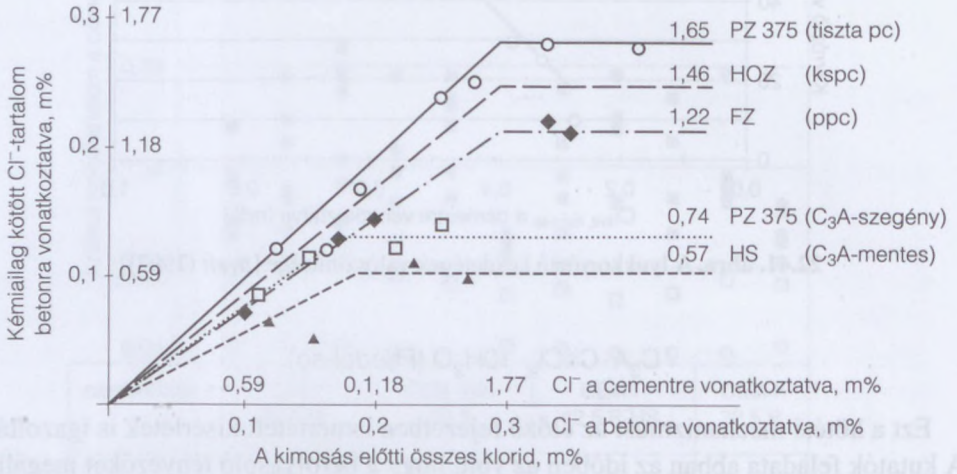
– A monoszulfát bomlik el;

– Friedel-só keletkezik és nemcsak a C_3A-ból, hanem a C_4AF-ből is.

A monoszulfát ettringitté alakul vissza.

Alkáli-hidroxid (NaOH) szabadul fel, amely növeli az alkáli-adalékanyag reakció veszélyét.

Lukas (1983) különböző összetételű mintákkal kísérletezett. Nem tekintette kötöttnek a cementkőből alkohollal kimutatható kloridtartalmat. Arra a következtetésre jutott, hogy a kémiailag kötött kloridion mennyisége a cementfajtától függ (*22.42. ábra*). A kémiailag kötött kloridion mennyisége kezdetben arányosan nőtt a betonba hatolt összes kloridtartalommal, majd konstans lett. Mivel a szulfátálló cement is megkötött kloridiont, feltételezte, hogy a C_4AF-ből is keletkezett Friedel-só.



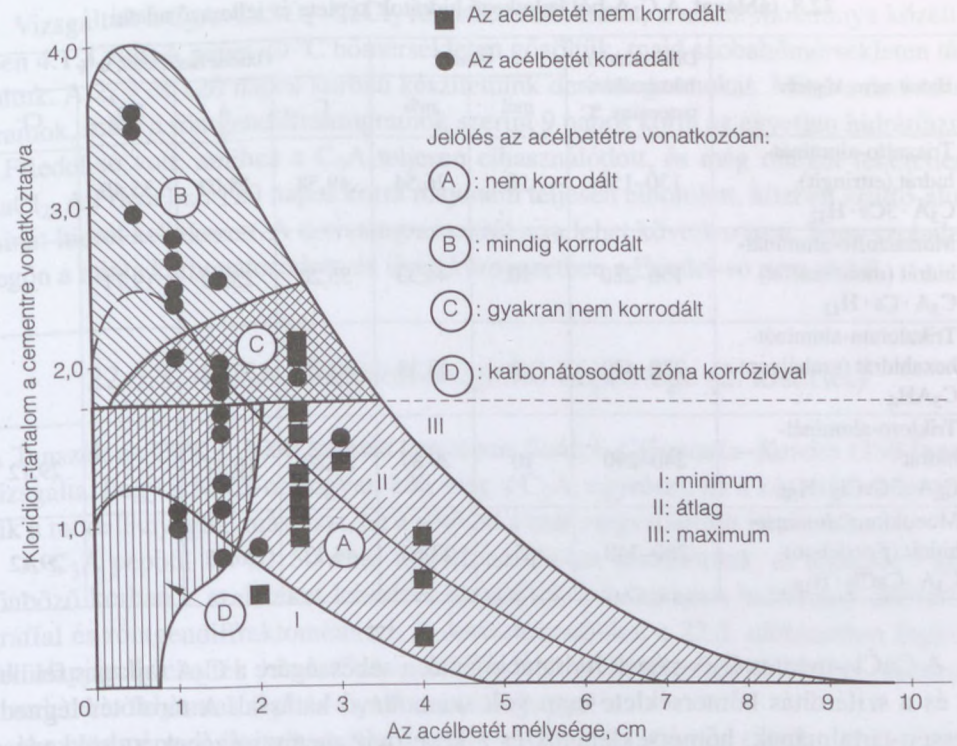
22.42. ábra. A kémiailag kötött kloridion mennyisége a cementfajtától függően [*Lukas* (1983)]

Lukas (1983) 15 éves betonburkolatot vizsgált, és annak az eredményeit foglalta össze (*22.43. ábra*). A kloridtartalmat cm-ként vett furatmintákból határozta meg. 52 helyről vett mintát, ebből 36 helyen 15–40 mm mélységben acélbetéteket is talált. A vizsgálati helyek környékén repedés nem volt. *Lukas* a veszélyeztetett területeket görbékkel határolta. *Lukas* az 1,8% kloridtartalomnak megfelelő vízszintes vonalat is berajzolta, amit közepes küszöbértéknek tekintett és a kémiailag kötött kloridtartalomnak felelt meg. A küszöbérték alatti „A" jelű területen nem, a „B" területen majdnem mindig észlelt korróziót. A „C" jelű területen gyakran nem lépett fel korrózió. A „D" zóna pedig azt jelzi, hogy a karbonátosodott zónában kis (0,3–0,5%) kloridtartalom esetén is mindig volt korrózió.

Richartz (1969) a 0,4% kloridiont – a cement tömegére vonatkoztatva – biztonságos határnak tekintette.

A kloridkötésben meglévő bizonytalanság arra ösztönözte a kutatókat, hogy tanulmányozzák a kloridkötést befolyásoló tényezőket. A szabályzatok alkotóit pedig arra, hogy segítsék elő szabályzati előírásaikkal a kloridionok betonba jutásának a késleltetését vagy meggátolását.

Ebbe a kutatásba kapcsolódott be a BME Építőanyagok Tanszék, hogy alapkísérletekkel tisztázza a kloridkötést befolyásoló tényezőket. A kutatás során abból indultak ki, hogy a hidrátok által kötött kloridion nem okoz korróziót.



22.43. ábra. Hídvizsgálatok korróziós tapasztalatai *Lukas* (1983) szerint

22.5.2. A C_3A kloridion-megkötő képessége (1. kísérlet)

Borosné–Balázs (1972) igen részletesen tanulmányozta a C_3A–$CaSO_4$–$CaCl_2$–H_2O rendszer hidratációját abban az esetben, amikor a kristályos kalcium-kloridot készítéskor keverik a rendszerbe. A hidratáció folyamatát derivatográffal és röntgendiffraktométerrel is nyomon követtük. A derivatogramok értékeléséhez a számítások alapját képező hidrátok disszociációs hőmérséklettartományát, az egyes hidrátok kémiai kötésben feltételezett vízmolekulái számát és százalékát, valamint oxidos összetételét a *22.8. táblázat* tartalmazza.

A kutatás eredményei röviden:

A C_3A–$CaCl_2$–H_2O rendszer hidrátjainak elsősorban derivatográfiás értékelése alapján megállapították, hogy a hidratáció sebességét a keverővíz mennyisége a C_3A fajlagos felülete, a komponensek aránya, a hidratálás és a tárolótér hőmérséklete, utóbbi légnedvesség-tartalma stb. különböző mértékben befolyásolja. A képződött hidráttermékek minősége, mennyisége és egymáshoz viszonyított aránya szintén a paraméterek függvénye.

22.8. táblázat. A C_3A-ból keletkező hidrátok képlete és jellemző adatai

Hidrát neve, képlete	Disszociációs hőmérséklet-tartomány, °C	$H_{szerk.}$		Oxidos összetétel, m%			
		mól	m%	C	A	SO_3^{2-}	Cl^-
Triszulfo-aluminát-hidrát (ettringit) $C_3A \cdot 3Cs \cdot H_{32}$	130–150	10	26,54	49,58	15,02	35,40	–
Monoszulfo-aluminát-hidrát (monoszulfát) $C_3A \cdot Cs \cdot H_{12}$	150–250	10	44,33	55,20	25,09	19,71	–
Trikalcium-aluminát-hexahidrát (szabályos) C_3AH_6	280–430	5	33,33	62,27	37,73	–	–
Trikloro-aluminát-hidrát $C_3A \cdot 3CaCl_2 \cdot H_{30}$	240–290	10	29,87	27,89	16,91	–	29,12
Monokloro-aluminát-hidrát (Friedel-só) $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot H_{10}$	280–340	5	23,63	44,13	26,75	–	29,12

A $CaCl_2$-mentes C_3A-pépek hidratációjának a sebességére a C_3A fajlagos felülete és a szilárdítás hőmérséklete nem volt számottevő hatással. A tárolótér légnedvesség-tartalmának, hőmérsékletének és a keverővíz mennyiségének a csökkenése – 24 órás kortól – a hidratáció mértékének csökkenését vonta maga után.

A $CaCl_2$-mentes C_3A-pépek hidratációjának a sebessége a kloridmentesekéhez képest csökkent, a kloridtartalom növelése esetén azonban nőtt, de csak 30% névleges $CaCl_2$-tartalom esetén érte el a kloridmentes pép értékeit.

A különböző $CaCl_2$- és $CaSO_4$-tartalmú rendszerek hidratációs mechanizmusára vonatkozóan feltételeztük, hogy mind a tri-, mind a monokloro-aluminát-hidrátok – szemben a monoszulfát képződéssel – topokémiai reakció révén keletkeznek, amit következőkkel támasztottunk alá:

Gipsztartalmú rendszerekben a kiindulási $CaCl_2$ és $CaSO_4$ mennyiségétől függetlenül mindig lényegesen több kloro-aluminát-hidrát képződik, mint szulfo-aluminát-hidrát. A két stabilis hidrát: a Friedel-só és az ettringit képződött mennyiségének aránya – a kiindulási alkotók arányának figyelembevételével – azzal indokolható, hogy a $CaCl_2$-ot oldatban adagoljuk, a gipszet pedig szilárd halmazállapotban, s ennek oldékonysága közismerten kicsi. A klorid- és szulfátionok ionmozgékonysága különbségét szintén nem lehet elhanyagolni.

A hidratálás hőmérsékletének növelése hátráltatja a topokémiai reakciókat. A 70 °C-os gőztérben érlelt pépek Friedel-só tartalmának a csökkenése topokémiai reakcióval lehet kapcsolatos.

A C_3A fajlagos felületének növelése esetén a hidrátokba épült $CaCl_2$ mennyisége nő, ugyanakkor a hidrátokba épült $CaSO_4$ mennyisége csökken.

Vizsgáltuk a C_3A–$CaSO_4$–$CaCl_2$ rendszer stabilitását, a minta mólaránya közelítően 4:1:3 volt. A pépet 70 °C hőmérsékleten gőzöltük, majd szobahőmérsékleten tároltuk. A 2, 9 és 120 napos korban készítettünk derivatogramokat. Mind a derivatogramok, mind a röntgendiffraktogramok szerint 9 napos korig az egyetlen hidrátfázis a Friedel-só volt, amihez a C_3A teljesen elhasználódott, és még maradt lekötetlen $CaCl_2$. A Friedel-só 120 napos korra majdnem teljesen elbomlott, közben szulfo-aluminát-hidrát keletkezett. A derivatogramokról arra lehet következtetni, hogy szobalevegőn a minta karbonátosodott, és ilyen környezetben a Friedel-só nem stabil.

22.5.3. A C_3A kloridion-megkötő képessége (2. kísérlet)

A Tanszék az OTKA 3000 kutatás keretében *Balázs–Csizmadia–Kovács* (1997) azt vizsgálta, hogy a NaCl-ot hogyan köti meg a C_3A, egyrészt, ha a készítéskor kevertük a modellanyagba, másrészt, ha a sóoldat a már megszilárdult betonra hatott.

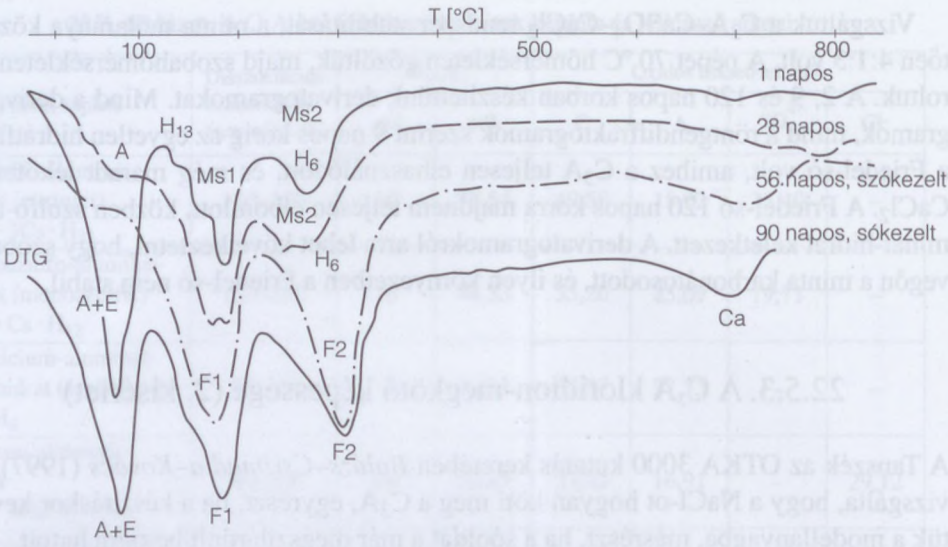
A C_3A pépből $10 \cdot 10 \cdot 50$ mm^3 méretű hasábokat készítettünk, és azokból – különböző korban – szeleteket lehasítva vizsgáltuk a keletkezett hidrátokat derivatográffal és röntgendiffraktométerrel. A derivatogramokat a *22.8. táblázatban* foglaltak alapján értékelték ki. A C_3A-napos nedves utókezelés kívül kisebb számban kísérleteket folytattak C_3S és C_4AF modellanyaggal is.

Az eredmények összefoglalása [*Balázs–Csizmadia–Kovács* (1997), *Balázs–Kopecskó* (2003)]:

Röntgendiffrakciós spektrumok alapján bebizonyítottuk és derivatográfiával is igazoltuk, hogy a készítéskor belekevert NaCl klorid-ionját a kalcium-aluminátok (C_3A és C_4AF) kötik meg $C_3A \cdot CaCl_2.10H_2O$ (Friedel-só), illetve $C_3F \cdot CaCl_2.10H_2O$ (Friedel-só vasanalógja) formában. Tehát a NaCl-nak előbb át kell alakulnia $CaCl_2$-dá, hogy a C_3A-tal, illetve a C_4AF-tel komplexet képezhessen. Ezért van az, hogy a Ca^{2+} ionoknak a rendszerbe juttatása [$Ca(OH)_2$, $CaSO_4$ adagolása] nagymértékben meggyorsítja a Friedel-só, $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ képződését.

A kutatás azt is igazolta, hogy akkor is hasonlóan megkötődik a NaCl, ha a sóhatás a már megszilárdult modellanyagot éri (*22.44. ábra*).

- A NaCl-nak csak a kloridionja épül be a hidrátkomplexbe, a nátrumionok a pórusvíz Na^+ tartalmát növelik, és ezáltal növelhetik az adalékanyag-alkáli korrózió veszélyének valószínűségét. Az erősen poláris NaCl jelenléte miatt, mind a keverővízzel adagolt NaCl-ot tartalmazó mintáknak, mind a NaCl-oldattal kezelt mintáknak 5–6% nagyobb a nedvességtartalma, mint a sózásnak ki nem tett mintáké.
- Ha a C_3S klinkerásvány pépeket hasonlóan NaCl-oldattal kezeltük, akkor kloridtartalmú kalcium-szilikát, illetve kalcium-szilikát-hidrát keletkezését röntgendiffrakciós módszerrel nem tudtuk kimutatni. Minden esetben megfigyeltük azonban a NaCl-ot tartalmazó és a NaCl-oldattal kezelt C_3S mintákban a hidratáció sebességének és a nedvességtartalomnak a megnövekedését.



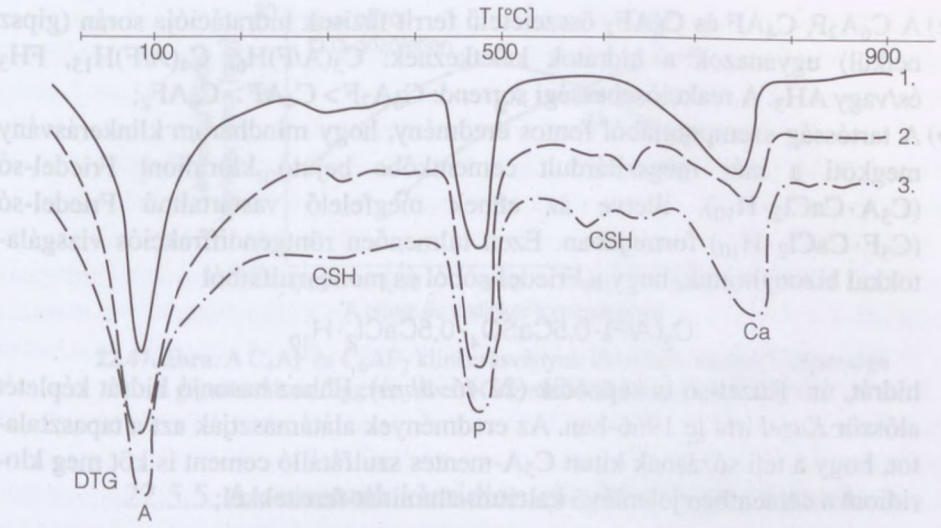
22.44. ábra. Különböző korú trikalcium-aluminát minták DTG görbéinek összehasonlítása (1, 28, 56 és 90 napos minták). Minták összetétele: 20 g C_3A, 6 g gipsz, 20,8 g víz. Sókezelés: 28 és 56 napos kor között 100 g/NaCl oldatban tárolva [*Balázs–Csizmadia–Kovács* (1997)]

Jelmagyarázat: A – adszorbeált vízből származó tömegveszteség,
A + E – adszorbeált vízből és ettringitből származó tömegveszteség,
H_{13} – a kalcium-aluminát-hidrát (szerkezeti vizéből származó tömegveszteség,
H_6 – a hidrogránát (C_3AH_6) szerkezeti vizéből származó tömegveszteség,
Ms1 és Ms2 – a monoszulfát kétlépcsős ($C_3A{\cdot}CaSO_4{\cdot}H_{12}$) vízvesztése,
F1 és F2 – a Friedel-só kétlépcsős ($C_3A{\cdot}CaCl_2{\cdot}H_{10}$) vízvesztése,
Ca – kalcium-karbonátból ($CaCO_3$) származó tömegveszteség

– Bár a szakirodalom is csak a C-S-H (kalcium-szilikát-hidrát) gél által szekunder erőkkel kötött kloridokról ad számot, lehetséges, hogy a NaCl nem csupán a reakciósebesség növelésében játszik szerepet, hanem a keletkezett C-S-H szerkezetét is befolyásolja. A derivatogramokon ugyanis az irodalom által a C-S-H dehidratációjára megadott hőfoktartományban (550–670 °C) a NaCl-ot tartalmazó, illetve a NaCl oldattal kezelt mintáknál jellegzetes DTG csúcsok (580, 630 °C) jelentek meg, míg tiszta C_3S minták derivatogramjain csak enyhe hajlat jelezte a vízleadást (*22.45. ábra*).

22.5.4. A kalcium-aluminát-ferrit klinkerásványok kloridion-megkötő képessége

Előző fejezetben ismertetett kísérletekkel bizonyítottuk, hogy a cementben lévő C_3A a téli szórással betonba jutó kloridionokat is megköti. A szulfátálló S54 jelű cementben azonban nincs C_3A. Cementkísérleteink szerint ez is köt meg kloridiont, ez pedig csak a kalcium-aluminát-ferrit klinkerásványok által lehetséges.



22.45. ábra. 180 napos korú trikalcium-szilikát minták DTG görbéinek összehasonlítása.
Összetétel: 10 g C_3S és 3 g víz.
Kezelések: 1. sókezelés nélküli minta, 2. a keverővíz 1,5% NaCl-ot tartalmaz,
3. a minta 28 és 56 napos kor között 10%-os NaCl oldatban tárolva
[*Balázs–Csizmadia–Kovács* (1997)]
Jelmagyarázat: A – adszorbeált víz, CSH – a kalcium-szilikát-hidrát
szerkezeti vizéből származó tömegveszteség, P – $Ca(OH)_2$ portlanditból származó vízvesztés,
Ca – $CaCO_3$ kalcium-karbonátból származó tömegveszteség

Az irodalom értékelése alapján világossá vált, hogy a kalcium-aluminát-ferrit klinkerásványok kloridion megkötése majdnem ismeretlen terület. Ezért az általánosan cementalkotóként ismert C_4AF mellett még két kalcium-aluminát-ferritet, a C_6A_2F és a C_6AF_2 klinkerásványt is vizsgáltuk.

A kutatásra az OTKA 019414 számú kutatási szerződés adott lehetőséget. A véglegesített kutatási tervben annak a vizsgálata szerepelt, hogy a C_6A_2F, C_4AF és a C_6AF_2 klinkerásványokkal megköthető-e a téli jégtelenítő sózásra használt konyhasó. A klinkerásványokkal tervbe vett kísérletek során: 10/1, 10/2, 10/3, 10/4, illetve 10/5 tömegarányú gipszkő: klinkerásvány keverékekből $10 \cdot 10 \cdot 50$ mm méretű péptesteket készítettünk. Ezek felét exszikkátorban, közel 100% relatív légnedvességű térben tároltuk, másik felét 28–56 napos korban naponként váltakozva 10%-os NaCl-ot tartalmazó sóoldat hatásának tettük ki.

Ezenkívül 10/3 tömegarányú gipszkő/klinkerásvány tartalommal készítettünk 1–1 hasábot, melyet 60–70 °C hőmérsékletű térben gőzöltünk, és gőzölés után a gőzöletlenhez hasonlóan kezeltük. A hasábokon 24 órás, 28, 56, 90 és 180 napos korban először meghatároztuk a hasító-húzószilárdságot, majd a lehasított és elporított darabot derivatográfiás, esetenként röntgendiffrakciós vizsgálatnak vetettük alá.

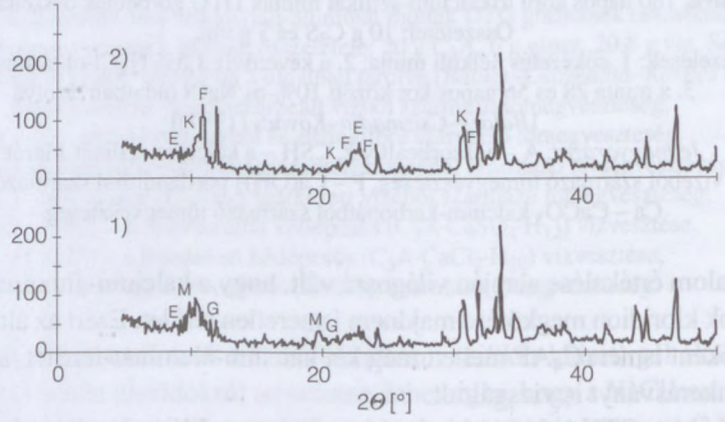
A kutatás eredményeinek összefoglalása [*Csizmadia–Balázs–Tamás* (2000), *Kopecskó–Balázs* (2003)]:

a) A C_6A_2F, C_4AF és C_6AF_2 összetételű ferrit fázisok hidratációja során (gipsz nélkül) ugyanazok a hidrátok keletkeznek: $C_3(A/F)H_6$, $C_4(A/F)H_{13}$, FH_3 és/vagy AH_3. A reakciósebességi sorrend: $C_6A_2F > C_4AF > C_6AF_2$;

b) A tartósság szempontjából fontos eredmény, hogy mindhárom klinkerásvány megköti a már megszilárdult cementkőbe bejutó kloridiont Friedel-só ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot H_{10}$), illetve az ennek megfelelő vastartalmú Friedel-só ($C_3F \cdot CaCl_2 \cdot H_{10}$) formájában. Ezen túlmenően röntgendiffrakciós vizsgálatokkal bizonyítottuk, hogy a Friedel-sóból és monoszulfátból

$$C_3(A/F) \cdot 0{,}5CaSO_4 \cdot 0{,}5CaCl_2 \cdot H_{10}$$

hidrát, ún. Kuzel-só is képződik (*22.46. ábra*). Ehhez hasonló hidrát képletét először *Kuzel* írta le 1966-ban. Az eredmények alátámasztják azt a tapasztalatot, hogy a téli sózásnak kitett C_3A-mentes szulfátálló cement is köt meg kloridiont a cementben jelenlévő kalcium-aluminát-ferritekkel;

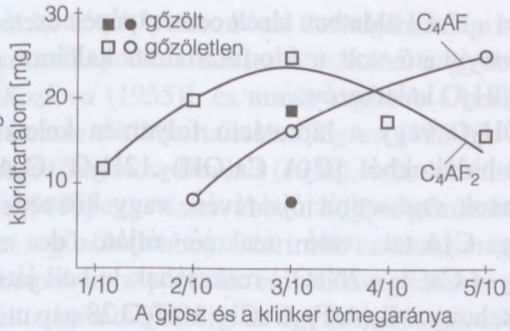


22.46. ábra. 1/10 tömegarányú, gipsz és C_6AF_2 klinkerásványból készített minták röntgendiffraktogramjai. Kezelések: 1. sókezelés nélkül, 28 napos hidratáció, 2. hidratált minták, sókezelés 18 és 56 napos kör között. Jelölése: F – Friedel-só, K – Kuzel-só, E – ettringit, M – monoszulfát, G–gipsz [*Balázs–Kopecskó* (2004)]

c) A gipsz szerepe a Cl^- megkötésben összetett: egyrészt elősegíti a Cl^- megkötését $C_4(A/F)H_{13} \rightarrow C_3(A/F)H_6$ átalakulás gátlása révén; másrészt gátolja az ettringit monoszulfáttá alakulását, ezáltal a

$C_3(A/F) \cdot 0{,}5CaCl_2 \cdot 0{,}5CaSO_4 \cdot H_{10}$ Kuzel-só képződését.

A vizsgált tartományban C_6A_2F és C_4AF klinkerásványok esetén 5:10 gipsz: klinker tömegaránynál észleltünk a derivatogramon legtöbb $C_3(A/F) \cdot CaCl_2 \cdot H_{10}$ hidrátot 180 napos korban (*22.47. ábra*). Ugyanezen az ábrán az is látható, hogy a 10:3 gipsz/klinkerásvány tömegarányú gőzölt minták kevesebb kloridiont kötnek meg, mint a gőzöletlenek.



22.47. ábra. A C_4AF és C_6AF_2 klinkerásványok kloridion-megkötő képessége a gipsztartalom függvényében [*Csizmadia–Balázs–Tamás* (2000)]

22.5.5. A cementek kloridion-megkötő képességének vizsgálata

E kutatás során a BME Építőanyagok Tanszéken a különböző ásványi összetételű cementek kloridion-megkötő képességét vizsgáltuk arra az esetre, ha a megszilárdult betonba kerül a téli sózás révén a NaCl. A kutatásban egymástól lényegesen eltérő ásványi összetételű cementeket választottunk [*Kovács–Csizmadiáné–Balázs* (1997)]:

- Gyorsan szilárduló tiszta pc, jel: 450 Rpc (mai jelölése: CEM I 42,5R);
- Szulfátálló tiszta pc, jele: S-54 (mai jelölése: CEM I 32,5 S);
- Kb. 20% pernyét tartalmazó pc, jele: 350 ppc 20 (mai jelölése: CEM II/A-V 32,5);
- Kb. 60% kohósalakot tartalmazó cement, jele: 250 kspc 60, (mai jelölése CEM III/A).

A próbatesteket a kötésvízzel készítettük. A sókezelés négyféle volt (kezelés naponta 1 percig):

- 10%-os NaCl oldatban 24 óra és 28 nap között;
- telített NaCl oldatban 24 óra és 28 nap között;
- 10%-os NaCl oldatban 28 nap és 56 nap között;
- telített NaCl oldatban 28 nap és 56 nap között.

Tárolás: 100% relatív páratartalmú térben, kb. 20 °C hőmérsékleten. A vizsgálat időpontjai: 1, 28, 90 és 180 nap. A próbatesteket derivatográffal és röntgendiffraktométerrel vizsgáltuk.

Összefoglalóan a következőket állapítottuk meg [*Balázs–Csizmadia–Kovács* (1997), *Balázs–Kopecskó* (2003)]:

a) Röntgendifrakciós spektrumok alapján bizonyítottuk és derivatográfiás vizsgálatokkal is igazoltuk, hogy a cementben a NaCl kloridionját a C_3A és C_4AF köti meg $C_3A \cdot CaCl_2.10H_2O$ (Fiedel-só), illetve $C_3F \cdot CaCl_2.10H_2O$ (Friedel-só vasanalógja) formájában.

b) A hidratáció során a NaCl oldatban tárolt cementpépek esetén mind a négy cementtípusnál bizonyítható volt a kloridtartalmú kalcium-aluminát-hidrát, a $C_3(A/F) \cdot CaCl_2.10H_2O$ keletkezése.

c) A $C_3A \cdot CaCl_2.10H_2O$ vagy a hidratáció folyamán keletkezett hexagonális kalcium-aluminát-hidrátokból [$C_3A \cdot Ca(OH)_2.12H_2O$, $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$] képződik az anionok szubsztitúciója révén, vagy közvetlenül keletkezhet a hidratáció során C_3A-tal való reakció útján, de ahhoz előbb az $2NaCl + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCl_2 + 2NaOH$ reakciónak le kell játszódnia. Vizsgálatainkkal igazoltuk, hogy a $C_3(A/F) \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ 28 nap után, tehát a megszilárdult betonban is képződik NaCl oldat hatására. A Na^+ nem épül be a beton szerkezetébe, hanem a pórusvízben dúsul fel.

d) A keletkező $C_3A \cdot CaCl_2.10H_2O$ mennyiségét (elsősorban) a cementben lévő C_3A és C_4AF mennyisége határozza meg adott töménységű NaCl oldat esetén.

e) Kloridtartalmú kalcium-szilikát-hidrát keletkezését röntgen-diffrakciós módszerrel nem tudtuk kimutatni. A szakirodalomban C-S-H gélek által kötött kloridokról még ez ideig nem sikerült bebizonyítani, hogy azok primer kémiai erőkkel lennének kötve. Kemiszorpcióval kötött kloridok fordulhatnak elő. A kémiai kapcsolat jellegének feltárása ezekben az esetekben nem volt lehetséges. A rendszerhez adagolt hidraulikus kiegészítők (kohósalak, pernye) a kémiai alapkapcsolatot nem befolyásolták jelentősen, azaz a konkrét kémiai kötés így is csak a C_3A, C_4AF klinkerásvánnyal volt kimutatható. A hidraulikus kiegészítő anyagok befolyásolták a kloridok adszorbeálódását.

f) Kísérleteinkkel bizonyítottuk, hogy a téli sózás során a betonba jutó NaCl-oldat reakcióba lép a cement C_3A és C_4AF tartalmával, s ezáltal növeli a beton tartósságát, ami nem jelenti azt, hogy a vasbeton szerkezetek korróziója szempontjából veszélytelen.

22.6. Az acélkorrózió veszélye gőzölt betonban

22.6.1. Korábbi korróziós kísérletek

22.6.1.1. Laboratóriumi kísérletek

Betonjaink jelentős része előre gyártott, gőzölt vasbeton szerkezet. Ezért célszerű tájékozódni arról, hogy a gőzölt vasbetonban eltér-e a kloridkötés a természetesen szilárdulóétól.

Ennek vizsgálatára jó alkalom nyílt *Balázs* (1963) *Gőzölés és kalcium-klorid együttes alkalmazása* c. kandidátusi értekezése készítésekor. Ezt is irodalomtanulmány előzte meg. Ebből néhány idevágó adat:

A vasbetonban a korrózió lyukkorrózió formájában lép fel. Továbbá a korrózió idővel csillapodik. A csillapodás annál lassúbb, minél nagyobb a kalcium-klorid-tartalom [*Panfilova–Kozlova* (1955)], és minél nagyobb a beton pórustartalma, valamint minél kisebb a cement klinkertartalma [*Egresi* (1960)].

A kutatók többsége [*Ratyinov–Dovzsik* (1959), *Arber–Vivian* (1960), *Evans* (1959), *Monfore–Verbeck* (1960)] egyetértett abban, hogy a gőzölt betonban nagyobb mérvű a korrózió, mint a gőzöletlenben. Szerintük ez azzal magyarázható, hogy a gőzölés hatására a betonban a pórusok és mikrorepedések szétnyílnak, ami megkönnyíti a víz és az oxigén diffúzióját az egymást követő nedvesedés és kiszáradás hatására.

Ugyanakkor *Szizov* (1958), *Mironov* és *Arobelidze* (1955) arról számoltak be, hogy a kalcium-kloridos vasbeton szerkezeteket évek óta gőzöléses eljárással gyártották több gyárban és szabadtéri előre gyártó telepen, de nem tapasztalták, hogy a vasbeton szerkezet korrózió miatt ment volna tökre. A kísérletek szerint a lyukkorrózió a 2% kalcium-klorid-tartalmú betonban megnőtt, de ez a növekedés nem csökkentette a vasbeton teherbíró képességét.

A gyakorlati káresetek közül megemlítik [*Monfore–Verbeck* (1960)] a kanadai Regina csővezeték esetét. Lövellt betonból előállított betoncsövek készítésekor a betonhoz 1,5–3,0% kalcium-kloridot adtak. A feszítőhuzalok egy része elszakadt a feszítőhuzal korróziója miatt. A Regina csővezeték meghibásodása után a „Portlandcement Egyesületben" nagyszabású kísérleteket indítottak a kalcium-klorid-tartalmú betonba ágyazott feszítőhuzalok korróziójában szerepet játszó tényezők hatásának tisztázására. Változók: az acélhuzal minősége, az igénybevétel módja (húzás, csavarás, hajlítás, terheletlen), a cement minősége, a cementek C_3A-tartalma, a fémzsaluzatban érlelési mód, a tárolási viszonyok és az oldható kloridmennyiség.

A kísérlet eredményei: a feszítőhuzalok korróziója portlandcementtel készített kloridionok jelenlétében betonban bekövetkezhet. A korrózió megjelenése véletlenszerű, ezért mennyiségi értékelése nehéz. Az érlelés hőmérséklete nem befolyásolja. Nedves környezetben nagyobb, mint szárazban, de még így is igen jelentős. A terheléstől és az acélminőségtől nem függ. A hosszanti repedésre való hajlam attól függ, hogy a huzalt milyen feltételekkel húzták. Valószínűnek tartják, hogy van egy olyan kritikus kloridmennyiség, amelynél kevesebb klorid nem okoz korróziót. A kalciumkloridot feszített betonszerkezetekben nem ajánlják.

Voltak, akik vitatták a cement C_3A-tartalmának a korrózióra gyakorolt hatását. 1962-ben az Építésügyi Minisztérium bekérte a vezetése alá tartozó vállalatoktól a kalcium-klorid, valamint Tricosal SIII használatára vonatkozó építési tapasztalatokat. Nem jelentettek egyetlen esetet sem, amikor a klacium-klorid használata miatt következett volna be károsodás.

Bár az IMS szerkezetek korróziója később fordult elő, de idekívánkozik, mint korróziós eset. A vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy az IMS vázszerkezetű

épületekben a feszültség alatti acélhuzalokon lejátszódott kloridos korróziót a szerkezetbe beépített hézagkitöltő habarcs, az ún. PU-paszta igen nagy vízoldható kloridtartalma okozta [*Balázs–Kopecskó* (2003)].

A külföldi adatok ismeretében a következő tanszéki kísérletet végeztük [*Balázs* (2003)]. A befolyásoló körülmények közül a következők hatását vizsgáltuk:

a) A cementek minőségének hatását úgy, hogy az egyes cementek kémiai és ásványtani összetétele távol essék egymástól. Így esett a választás a
   - tatabányai 600-as pc-re (megfelel: CEM I 52,5),
   - S-54 jelű szulfátálló pc-re (megfelel: CEM I 32,5 S),
   - hejőcsabai 400-as kohósalak pc-re (megfelel: CEM II/A-S 42,5).

b) A cement mennyiségét általában 450 kg/m^3-re választottuk. Csak a tatabányai 600-as pc-vel készítettünk eltérő cementtartalmú betonokat. Ezek víz-cement tényezője is változott. Nevezetesen:
   - 450 kg/m^3 cement esetén $m_w/m_c = 0{,}4$,
   - 350 kg/m^3 cement esetén $m_w/m_c = 0{,}5$,
   - 250 kg/m^3 cement esetén $m_w/m_c = 0{,}6$ volt.

Az adalékanyag dunai eredetű folyami homokoskavics, $d_{max} = 16$ mm volt.

A kísérlethez technikai minőségű kalcium-kloridot ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$) használtunk, amelynek kb. a fele víz. A kalcium-klorid cementre vonatkoztatott mennyiségét a *22.9. táblázat* szemlélteti.

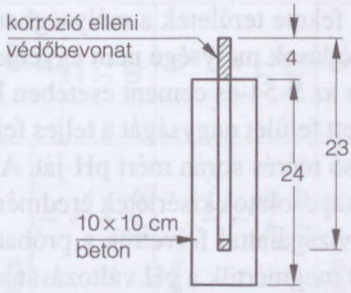
22.9 táblázat. A kalcium-klorid cementre vonatkoztatott mennyisége

A cement minősége	A kalcium-klorid mennyisége, m%
S 54 jelű pc-nél (450 kg/m^3)	0; 0,6; 1,0; 1,5; 2,0 m%
Tatabányai 600-as pc-nél (450 kg/m^3)	0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 m%
Tatabányai 600-as pc-nél (350 kg/m^3)	0; 0,6; 1,0; 1,5; 2,0; 4,0 m%
Tatabányai 600-as pc-nél (250 kg/m^3)	0; 0,6; 1,0; 1,5; 2,0; 4,0 m%
Hejőcsabai 400-as pc-nél (450 kg/m^3)	0; 1,0; 2,0; 3,0 m%

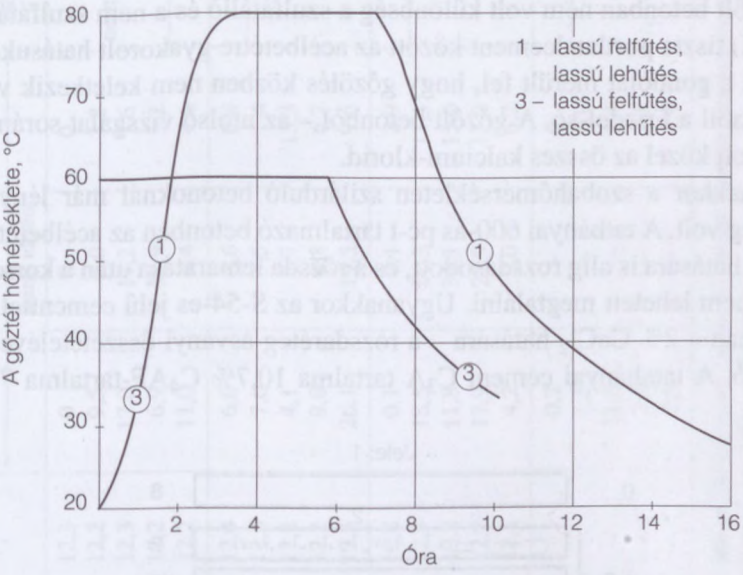
Egy-egy csoportban 8-8 db $10 \times 10 \times 24$ cm méretű hasábot készítettünk. Ezek közül a korróziós vizsgálatra szánt 6-6 db próbatest középvonalába helyeztünk acélbetétet. 2-2 próbatesten pedig a beton tömörségét határoztuk meg.

A beton gyengén képlékeny konzisztenciájú volt, a sablonba – igen gondosan – kézi erővel dolgoztuk be. A próbatestet fekvő helyzetben először félik tömörítettük, majd elhelyeztük az acélbetétet a *22.48. ábra szerint.* Majd bedolgoztuk a beton másik felét is. A 23 cm hosszú acélbetétből 4 cm kiállt. A kiálló részt, valamint a bebetonozott végén 0,5 cm-t korróziógátló bevonattal láttuk el. Egyébként az acélbetét felületét simára csiszoltuk.

A gőzölési diagramot a *22.49. ábra* szemlélteti. Úgy választottuk meg, hogy lehetőleg megfeleljen a cement minőségétől függő feltételnek. Így az S-54 jelű és tata-



22.48. ábra. A korróziós vizsgálatokhoz használt betonelektróda [*Balázs* (2001)]



22.49. ábra. A gőzölési diagramok típusai [*Balázs* (2001)]

bányai portlandcementtel készített betont 60 °C hőmérsékleten 6 órán át, a hejőcsabai 400-as jelű kohósalak portlandcementtel készített betont 90 °C hőmérsékleten 6 órán át gőzöltük.

A próbatesteket háromféleképpen tároltuk:

– laboratóriumi körülmények között (nedves utókezelés nélkül),

– vízben,

– váltakozva: 1 hétig vízben, 3 hétig laboratóriumi levegőn.

A tatabányai 600-as ps-tel és az S-54-es jelű pc-tel készítettünk gőzöletlen hasábokat is.

Minden esetben végeztünk roncsolásos vizsgálatot is. Ez azt jelentette, hogy 28–44 napos és 3–4 hónapos korban kivettük az acélbetétet, és elkészítettük a korrodált acélbetétnek a kiterített palástra rajzolt képét. A letörölhető rozsda képét csak a kerületével ábrázoltuk. A vonalkázás a le nem törölhető, de az acélbetétbe be nem

rágódott korróziót jelöli. A fekete területek a mélységben is tapasztalt korróziót jelzik. Természetesen a berágódások mélysége nem egyenletes. A rozsda így felrajzolt képe a *22.50.–22.53. ábrán* az S-54-es cement esetében látható. Táblázatban foglaltuk össze a korróziónak kitett felület nagyságát a teljes felületre vonatkoztatva (%), a korrózió mélységét az utolsó mérés során mért pH-ját. A *22.10. táblázat* az S-54 jelű, korrózióálló cementtel kapcsolatos kísérletek eredményét tartalmazza.

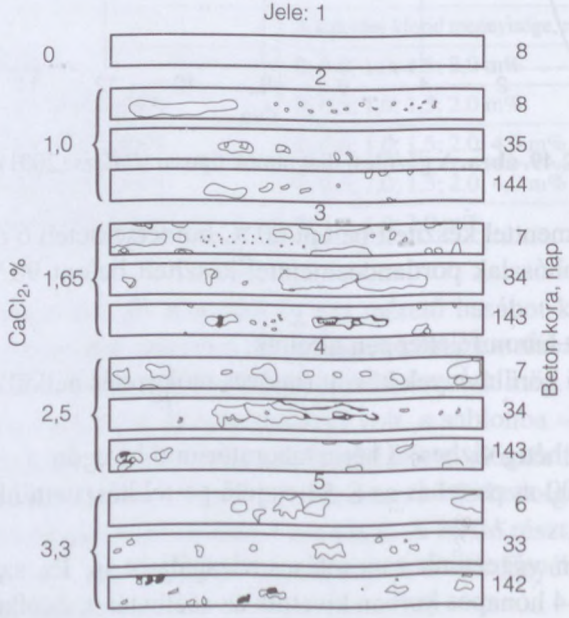
Továbbá elektrokémiai vizsgálattal felvettük a próbatestek áramerősség-feszültség karakterisztikáit. Végül megmértük a pH változását a $CaCl_2$ hatására.

A kísérleti eredmények értékelése

a) A cementminőség hatása:

A gőzölt betonban nem volt különbség a szulfátálló és a nem szulfátálló (tatabányai) tiszta portlandcement között az acélbetétre gyakorolt hatásukat tekintve. Az a gondolat merült fel, hogy gőzölés közben nem keletkezik vagy nem lesz stabil a Friedel-só. A gőzölt betonból – az utolsó vizsgálat során – kioldható volt közel az összes kalcium-klorid.

Ugyanakkor a szobahőmérsékleten szilárduló betonoknál már lényeges különbség volt. A tatbányai 600-as pc-t tartalmazó betonban az acélbetét még 2% $CaCl_2$ hatására is alig rozsdásodott, és a rozsda lemaratása után a korrózió nyomatit nem lehetett megtalálni. Ugyanakkor az S-54-es jelű cementtel készített betonban – 2% $CaCl_2$ hatására – a rozsdaréteg ásványi összetételével magyarázható. A tatabányai cement C_3A tartalma 10,7% C_4AF-tartalma 7,45%, az

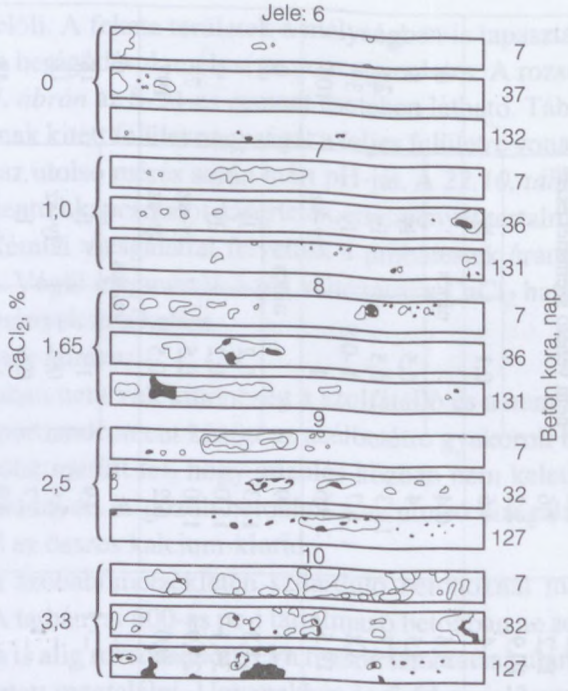


22.50. ábra. A korrózió kialakulása acélbetét felületén. Cement: 450 kg/m³ S-54 jelű pc. Szilárdítás: gőzölés 60°C-on 6 órán át. Tárolás: vízben [*Balázs* (2001)]

22.10 táblázat. A kalcium-klorid hatása a 450 kg/m³ S54 jelű cementet tartalmazó betonba helyezett acélra [*Balázs* (2001)]

Jele	$CaCl_2$, m%	Tárolás módja	Tömörség	pH	Korrodált felület, %			Lyukkorrózió*		Tömeg-veszteség, g/m²
					1.	2.	3.	mélysége	jellege	
					mérés idején					
1	0	vízben	0,840	12,3	0	0	0	nem vehető szemmel észre		
2	1		0,850	12,2	9,5	6,0	3,8			
3	1,65		0,840	12,3	17,0	17,2	7,6			
4	2,5		0,846	12,2	6,9	10,9	5,2			
5	3,3		0,850	12,2	11,0	4,4	4,6	0,1	ly	
6	0	váltakozó	0,853	12,4	6,0	3,6	0,4	nincs		0
7	1		0,853	12,3	7,0	5,5	1,4	0,5	ly	8
8	1,65		0,850	12,2	4,1	7,7	13,3	0,5	ly	23
9	2,5		0,855	12,2	9,0	4,8	6,7	1–0,5	ly	37
10	3,3		0,850	12,3	26,1	19,5	9,6	1	ly–sz	103
11	0	szoba-levegőn	0,860	12,2	0,1	2,1	2,9	nincs		0
12	1		0,840	12,3	18,5	11,3	11,3	0,2	ly	–
13	1,65		0,840	12,8	11,8	34,1	15,0	0,2	ly	–
14	2,5		0,845	12,2	17,9	27,9	17,0	0,5	ly–sz	77
15	3,3		0,860	12,1	4,2	9,0	6,2	0,5	ly–sz	197
16	0	váltakozó	0,854	–	0,7	–	0	nincs		0
17	1		0,853	–	1,5	–	0,9	1	ly	18
18	1,65		0,860	–	11,8	–	5,4	0,3	ly–sz	12
19	2,5		0,855	–	7,6	–	2,7	0,5	ly	–
20	3,3		0,843	–	2,5	–	4,9	1	ly–sz	48

Megjegyzés: 1–15 jelű hasábok: gőzölés 60 °C-on 6 órán át az 1. jelű gőzölési diagram szerint; 16–20 jelű hasábok: természetes szilárdulás.
*A 3–4 hónapos korban megállapított korrózió, ly= határozott szélű lyuk; sz=felületi szövetritkulás.



22.51. ábra. A korrózió kialakulása az acélbetét felületén. Cement: 450 kg/m³ S-54 jelű pc. Szilárdítás: gőzölés 60 °C-on 6 órán át. Tárolás: váltakozó [*Balázs* (2001)]

S-54 jelű cement C_3A tartalma 0%, C_4AF-tartalma 6,34% volt. A tanszék kutatói ezt azzal magyarázták, hogy az s 54-es jelű cementben nincs C_3A, amely a $CaCl_2$-dal Friedel-sót alkothatna.

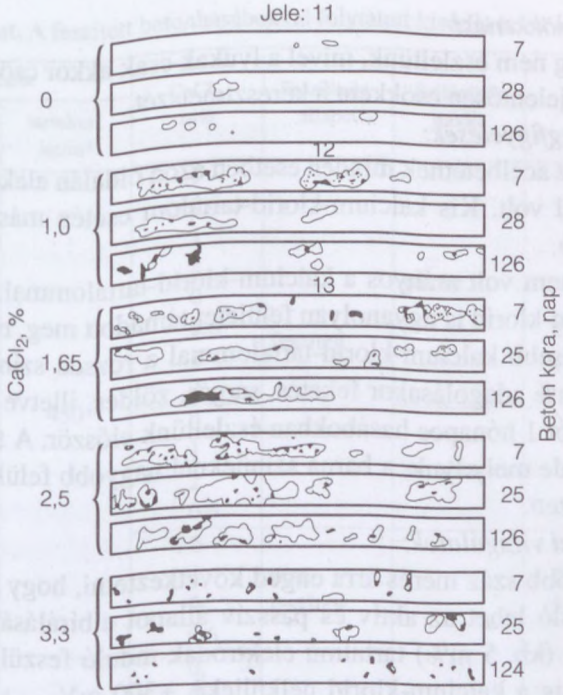
A hejőcsabai 400-as jelű portlandcementtel készített, kloridmentes, gőzölt betonban az acélbetét nem rozsdásodott. A 90 °C-on gőzölt betonban valószínűen már a gőzölés befejeztével sincs Friedel-só és a korrózió a három cement közül a legnagyobb volt. Érdekes jelenség a pH csökkenése a $CaCl_2$-tartalom és a tárolás módjának hatására. A vizsgált tartományban a korrózió jellege, mértéke és mélysége között nem észleltünk lényeges különbséget.

b) A tárolás módjának hatása:

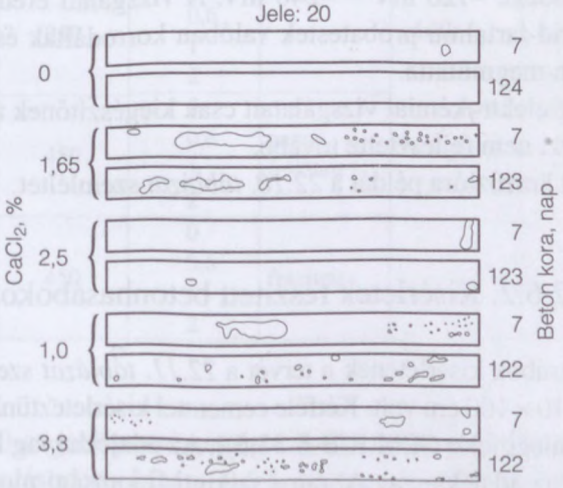
A tárolási módok közül a vízben tárolás eredményezte minden esetben a legkisebb felületi korróziót, mélységbeli korrózió pedig egyáltalán nem volt. Oka, hogy a víz gátolta az oxigén hozzájutását az acélbetéthez. Az is szerepet játszhatott, hogy a vízben csökkent a kloridkoncentráció.

Az S-54 jelű és a tatabányai 600-as jelű cementtel készített betonokban – különösen, ha a mélységbeli korróziót is figyelembe vesszük – a levegőn tárolás és a váltakozó tárolás között nem állapítottunk meg különbséget.

A hejőcsabai 400 jelű portlandcementtel készített betonban a szobalevegőn tárolás volt a legveszélyesebb, amit azzal magyaráztunk, hogy ebben az esetben



22.52. ábra. A korrózió kialakulása az acélbetét felületén. Cement: 450 kg/m³ S-54 jelű pc. Szilárdítás: gőzölés 60 °C-on 6 órán át. Tárolás: szobalevegőn [*Balázs* (2001)]



22.53. ábra. A korrózió kialakulása az acélbetét felületén. Cement: 450 kg/m³ S-54 jelű pc. Szilárdítás: természetes. Tárolás: váltakozó

volt a legkisebb a pH. A pH-érték csökkenése azonban önmagában még nem mértékadó. Szabad kalcium-klorid jelenlétében az acélbetét még 12,5 pH értéknél is korrodálódhat.

c) Szakítóerő-csökkenés:

Gyakorlatilag nem észleltünk, mivel a lyukak csak akkor csökkentik a szakítóerőt, ha már jelentősen csökkent a keresztmetszet.

d) Általános megfigyelések:

A korrózió az acélbetétnek minden esetben azon oldalán alakult ki, amely a készítéskor alul volt. Kis kalcium-klorid-tartalom esetén máshol nem is jelent meg korrózió.

A korrózió nem volt arányos a kalcium-klorid-tartalommal. Rendszerint már 0,6% kalcium-klorid is ugyanolyan felületet támadott meg, mint a 2%-os.

2 m%-nál kisebb kalcium-klorid-tartalommal a rozsda színe vörös, vörösesbarna, 2–3 m% adagolásakor feketés, sárgás, zöldes, illetve sárgás-fehér volt. Lyukkorróziót 1 hónapos hasábokban észleltünk először. A fekete pontban kicsi területű, de mély lyuk, a barna színűeknél nagyobb felületű, de nem mély lyuk keletkezett.

e) Elektrokémiai vizsgálatok:

A tanszéki több száz mérés arra enged következtetni, hogy az induló feszültség mértékadó lehet az aktív és passzív állapot elbírálásában. A nagy kalcium-klorid- (kb. 5 m%) tartalmú elektródák induló feszültsége –400 mV – –500 mV, míg a kalcium-klorid nélkülieké +300 mV – +580 mV volt. Az áramsűrűség-feszültség karakterisztikák szerint a kloridmentes elektróda induló feszültsége +300 mV volt, ugyanakkor az 1–3 m% kalcium-klorid-tartalmú elektródéké –120 mV – –240 mV. A vizsgálati eredmények szerint a kalcium-klorid-tartalmú próbatestek valóban korrodáltak és ezt a mérés már az első napon megmutatta.

A Tanszék az elektrokémiai vizsgálatait csak kiegészítőnek tekintette, és a későbbiekben ezt nem fejlesztette tovább.

A megfigyelt korrózióra példát a *22.10. táblázat* szemléltet.

22.6.2. Kísérletek feszített betonhasábokon

A feszített betonhasábok kísérletének a tervét a *22.11. táblázat* szemlélteti. A próbatestek mérete 10 × 10 × 100 cm volt. Kétféle cementtel kísérleteztünk [lábatlani 500-as kohósalak pc (jelenlegi jele: CEM II/B-S 32,5)]. Az adalékanyag legnagyobb szemnagysága 20 mm, az adalékanyag Abrams szerinti finomsági modulusa kb. 5 volt. A feszítő huzalokban a feszítő feszültséget 800 MPa-ra választottuk. A betont kézi erővel kevertük meg és vibrátorral dolgoztuk be. A gőzölési diagram közelítőleg megegyezett a *22.49. ábra* szerinti 1 jelű diagrammal. A gőzölés hőmérséklete a lábatlani 500-as pc-vel készített beton esetén 60 °C volt, a hejőcsabai 400-as jelű kohósalak pc esetében 90 °C volt. Azonos jelű próbatestekből 5–5 db-ot készítettünk. A korrózió jelenségét 7,28 napos és 6 hónapos korban szemrevételezéssel ellenőrizték.

22.11 táblázat. A feszített betonhasábokkal folytatott kísérlet terve [*Balázs* (2001)]

Kísérlet jele	Cement		$CaCl_2$, m%	Feszültségállapot	Szilárdítás módja	Acéljel	Tárolás módja
	fajta	tartalom, kg/m³					
1	lábatlani 500-as pc	450	0	feszített	gőzölt	150 KB (5 mm)	szabadban
2			0,6				
3			1				
4			2				
17			0				1 hónapig szárazon, utána szabadban
18			0,6				
19			1				
20			2				
21			0		természetes		szabadban
22			1				
23			2				
24			0,6				
37			0	nem feszített	gőzölt	36,24 B (5,5 mm)	
38			1				
39			2				
40			0,6				
41		350	0,	feszített		150 KB (5 mm)	
42			0,6				
43			1				
44			2				
45		250	0				
46			0,6				
47			1				
48			2				
57		450	0	nem feszített			
58			0,6				
59			1				
60			2				
9	hejőcsabai 400-as kohósalak-pc	450	0	feszített			
10			0,6				
11			1				
12			2				

Megfigyelések:

A lábatlani 500-as jelű pc-tel készített, kalcium-klorid nélküli, gőzölt betonban az acél nem rozsdásodott. Már a 0,6% kalcium-klorid adagolása esetén hamar megindult a helyi, vele egyidejűen a lyukkorrózió. 6 hónapos korra kb. az acélfelület 20%-át borította rozsdafolt, ennek kb. negyede volt lyukkorrózió. A lyukmélység 0,2–0,3 cm volt. Hasonló volt a helyzet a 1% kalcium-klorid-tartalmú betonban. Ennél erőteljesebb korróziót figyeltünk meg a 2% kalcium-klorid-tartalmú betonban. Ebben az esetben 1hónapos korban az acélfelület kb. 50%-át borította rozsdafolt. A rozsda csak az acél alsó felületén jelent meg, míg a felső felülete fényes, rozsda-

mentes maradt. A lyukak mélysége 0,1–0,2 cm, területe 1,0–1,5 cm^2 volt. 6 hónapos korra az acélfelület kb. 70%-a volt rozsdás, mintegy 15% lyukkal.

A hejőcsabai 400-as portlandcementtel készített gőzölt betonban a korrózió valamivel nagyobb volt, mint a lábatlani 500-as cementtel készítettben. A cementmennyiség változtatása a korrózió megjelenését és mértékét észrevehetően nem befolyásolta. Természetesen szilárduló betonban a 0,6–1,0 % kalcium-klorid még nem okozott lényeges korróziót. Ez arra utal, hogy a kalcium-klorid még megkötődött. Az a körülmény, hogy a huzalt megfeszítettük, a korrózió mértékén lényegében nem változtatott.

22.6.3. Kísérletek feszített vasbeton keresztaljakkal

A II. sz. Épületelem Gyárban szokványos technológiával készítettek 5 · 10 db vasúti keresztaljat és megvizsgálták. A beton összetétele: 480 kg/m^3 lábatlani 500-as pc, 0; 0,6; 1,0; 2,0% technikai kalcium-klorid, szokványosan javított szemmegoszlás (0–5 mm 32%, 5–15 mm 35%, 15–30 mm 33%), a betonkonzisztencia földnedves. Feszítőbetétként 5 mm átmérőjű, 150 KB jelű hullámosított acélhuzalt használtak. Ezenkívül készítettek 5 db vasúti keresztaljat képlékeny konzisztenciájú betonból, 1% kalcium-kloriddal a tömörség hatásának tanulmányozására. A keresztaljakat szabadon tárolták.

A vasbeton keresztaljakat 1, 7, 28, 90 és 180 napos korban vizsgáltuk meg. A következőket tapasztaltuk:

- A kalcium-klorid nélküli betonban a huzalok nem korrodáltak;
- A korrózió, ha létrejött, az mindig a hullámosított acélhuzal hullámvölgyében, illetve a kengyel és a feszítőhuzal érintkezésénél jelentkezett;
- A 0,6 és 1,0% kalcium-kloridot tartalmazó betonban a huzalok nagy része nem korrodált még 6 hónapos korban sem. A helyenként létrejövő korrózió csak a felületen jelent meg, elsősorban a kengyelek mellett. Az 1,0% kalcium-kloridot tartalmazó képlékeny betonból készített aljban és a 2,0% tartalmú földnedves betonból készített aljban a huzalok teljes felületének kb. 10%-a korrodált. Úgy ítéltük meg, hogy a betonok annyira tömörek voltak, hogy megnehezítették az oxigén hozzájutását az acélhoz.

22.6.4. A kloridkötéssel kapcsolatos legújabb kísérleteink

22.6.4.1. A kísérlet leírása

Az OTKA T 034467 sz. (2001–2005) kutatási szerződés lehetővé tette, hogy az eddigi ismeretek birtokában modellkísérletekkel az eddiginél jobban megismerjük a gőzölt beton kloridkötésének problémakörét [*Kopecskó–Balázs* (2003), *Kopecskó–Balázs* (2004)].

a) Kísérletek kalcium-aluminát klinkerásványokkal

Az eddigi kísérletek egyértelművé tették, hogy a kloridiont – bármilyen formában kerül a betonba – csak a C_3A és a C_4AF klinkerásványok köthetik meg. Először ezzel a két klinkerásvánnyal teljesen azonos felépítésű kísérletet végeztünk. A két klinkerásványt dr. *Révay* Miklós állította elő a CEMKUT Kft.-ben. Mindkét klinkerásványból hat mintasorozatot állítottunk össze. A *22.12. táblázat* mutatja az összetételeket, valamint a különböző kezeléseket. A 10/0 összetételi arány jelzi a gipszmentes aluminátmintát, a 10//1–10/5 összetételű mintákban 10 tömegrész aluminátot 1–5 tömegrész gipsszel kevertünk össze. Az anyagokat vízzel összekeverve hasonló bedolgozhatóságú konzisztenciára készítettük el, és $10 \times 10 \times 50$ mm-es sablonokba dolgoztuk be. Az 1-es és 2-es sorozat így előkészített péphasábjait szobahőmérsékleten (22 ± 1 °C) tároltuk, közel 100% relatív páratartalmú térben és 24 óra természetes szilárdulás után zsaluztuk ki. A mintákat (péphasábokat) ezután hasonló körülmények között (exszikkátorban 22 ± 1 °C hőmérsékleten) tároltuk tovább. A 3–6-os sorozat hasábjait úgy készítettük, hogy az előkészített, 2 órán át pihentetett pépet 3 órán át gőzöltük 60 °C, illetve 90 °C hőmérsékletű, atmoszférikus nyomású gőztérben. Az izotermikus érlelés után a próbatestek a gőzölőben hűltek le. Majd a továbbiakban szobahőmérsékleten tároltuk (22 ± 1 °C), közel 100% relatív páratartalmú térben (exszikkátorban). A sókezelés 10%-os NaCl oldatban váltakozó tárolást jelentett (24 órán át a sóoldatban, majd 24 órán át 100% relatív páratartalmú térben). Ezt a sókezelést mind a természetesen szilárdított, mind a gőzölt mintákon 28 és 38 napos kor között végeztük. A sókezelést követően a hasábokat szobahőmérsékleten (22 ± 1 °C) és közel 100% relatív páratartalmú térben tároltuk.

A megszilárdult mintákat röntgendiffraktométerrel és derivatográffal vizsgáltuk meg. A vizsgálatokat C_3A klinkerásvány esetén 1, 7, 28, 90 és 180 napos korban, a C_4AF klinkerásvány esetén 1, 7, 28, 56, 90 és 180 napos korban végeztük el. Az 1, 3 és 5 sorozatok vizsgálata lehetőséget nyújtott az aluminátok

22.12 táblázat. Az aluminátminták összetételei, valamint kezelése és tárolása

Sorozat	Az aluminát és gipsz tömegaránya	Minták kezelése és tárolása
1	10/0, 10/1, 10/2, 10/3, 10/4, 10/5	100% r.p., 22 °C
2	10/0, 10/1, 10/2, 10/3, 10/4, 10/5	100% r.p., 22 °C és sókezelés
3	10/0, 10/1, 10/2, 10/3, 10/4, 10/5	gőzölés 60 °C-on, majd 100% r.p.
4	10/0, 10/1, 10/2, 10/3, 10/4, 10/5	gőzölés 60 °C-on és sókezelés
5	10/0, 10/1, 10/2, 10/3, 10/4, 10/5	gőzölés 90 °C-on, majd 100% r.p.
6	10/0, 10/1, 10/2, 10/3, 10/4, 10/5	gőzölés 90 °C-on és sókezelés

hidratációjának, a természetes szilárdulás és gőzöléses szilárdítás hatásainak elemzésére különböző körülmények között, míg a 2, 4 és 6 sorozatok vizsgálatával a téli jégtelenítő sózás hatásának modellezésével a kloridion megkötő képességet tanulmányoztuk.

A péphasábokból a különböző vizsgálati korokban az aktuális mintát hasítással választottuk le. A hasítóerőt mértük. A C_3A esetén minden esetben 1 db hasítást tudtunk elvégezni. Ezt C_4AF esetén módosítottuk, párhuzamos hasításhoz minden sorozat minden összetételéből két péphasábot készítettünk. A teljes kísérleti sorozat végén a maradék, fel nem használt mintából nedves analitikai módszerrel megállapítottuk a minta összes kloridion-tartalmát.

b) Kísérletek cementekkel

Az aluminátokhoz hasonlóan gőzöléses, valamint sókezeléses kísérleteket végeztünk el három kiválasztott cement esetében [*Kopecskó–Balázs* (2005)]. A cementek különböző arányban tartalmazták a szilikáttartalmú klinkerásványok és cementkiegészítő anyagok mellett a C_3A és C_4AF klinkerásványokat. A cementek kémiai és ásványi összetételét a *22.13. táblázat* tartalmazza.

1. cementminta: CEM I 42,5 N portlandcement (DDC váci gyára),
2. cementminta: CEM III/A 32,5 N kohósalak cement, 40 m% kohósalaktartalommal (DDC váci gyára),
3. cementminta: CEM I 32,5 RS rapid szulfátálló cement (Holcim Rt. lábatlani gyára).

22.13 táblázat. A cementminták kémiai és ásványi összetétele

	CEM I 42,5 N	CEM III 32,5 N	CEM I 32,5 RS
	Összetétel m%		
SiO_2	19,79	26,41	20,10
Al_2O_3	5,57	6,07	4,35
Fe_2O_3	3,33	1,95	5,73
CaO	64,39	52,45	62,67
MgO	1,21	4,37	1,88
SO_3	2,94	3,08	2,91
K_2O	0,42	0,65	0,36
Na_2O	0,14	0,17	0,30
C_3S	58,65	35,19	53,36
C_2S	12,27	7,36	17,41
C_3A	8,51	5,11	1,79
C_4AF	10,42	6,07	17,42
Kiegészítő anyag	5,00 ($CaSO_4$)	3,00 ($CaSO_4$) ~40,00 (KS)	4,95 ($CaSO_4$)
KST	95,92	68,67	91,84
SM	2,22	3,29	1,99
AM	1,67	3,11	0,76

(Magyarázat: KS = őrölt granulált kohósalak)

A péphasábokon kívül 20 mm élhosszúságú kockákat is készítettünk. Az elkészített péphasábokat és kockákat hasonlóan kezeltük és tároltuk, mint a klinkerásványokból készített péphasábokat (*22.14. táblázat*). A cementek eredeti szulfáttartalmát nem változtattuk meg. A klinkerásvány-gipsz arányt a kalcium-aluminát-kísérletekben azért változtattuk, mert a cementmintákban eltérő volt a C_3A–$CaSO_4$ arány.

A péptesteket a kötésvízzel készítettük, melyek a következők voltak (v/c: a víz-cement tényezők):

1. cementminta: $m_w/m_c = 0{,}280$,
2. cementminta: $m_w/m_c = 0{,}305$,
3. cementminta: $m_w/m_c = 0{,}260$.

A hasító-húzószilárdság vizsgálatát a következőképpen végeztük: a péphasábokból – a különböző vizsgálati korokban – a fázisanalitikai vizsgálatokra szánt mintát hasítással választottuk le. A hasítóerőt mértük. A cementek esetén cementenként és koronként 2 db párhuzamos hasítást tudtunk elvégezni. Az összes kloridtartalmat a 180 napos korú mintákban nedves kémiai analitikai módszerrel, Mohr szerinti titrálással határoztuk meg. A kockaszilárdság vizsgálatára vizsgálati alkalmanként 3 db 20 mm élhosszúságú kockát készítettünk. Ahhoz, hogy a rendelkezésre álló törőgépen a kisméretű kockákat megbízhatóan (kis szilárdsági szórással) vizsgálni tudjuk, próbatestekhez illesztett gömbcsuklót iktattunk a próbatest és a nyomólap közé.

22.14 táblázat. A cementminták vizsgálatához tartozó kísérleti körülmények

Sorozat	Az aluminát és gipsz tömegaránya	Minták kezelése és tárolása
1	1.; 2.; vagy 3. cementminta	100% r.p., 22 °C
2	1.; 2.; vagy 3. cementminta	100% r.p., 22 °C és sókezelés
3	1.; 2.; vagy 3. cementminta	gőzölés 60 °C-on, majd 100% r.p.
4	1.; 2.; vagy 3. cementminta	gőzölés 60 °C-on és sókezelés
5	1.; 2.; vagy 3. cementminta	gőzölés 90 °C-on, majd 100% r.p.
6	1.; 2.; vagy 3. cementminta	gőzölés 90 °C-on és sókezelés

22.6.4.2. A sókezelt C_3A és C_4AF hidratációja különböző összetétel és szilárdítás esetén

Először röntgendiffrakcióval azonosítottuk a keletkezett hidrátokat.

A keletkezett hidrátok:

– hexagonális hidrát (H_{13}): $C_4A \cdot H_{13}$
– hexagonális hidrát (H_8): $C_4A \cdot H_8$
– ettringit: $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot H_{32}$
– monoszulfát: $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{12}$

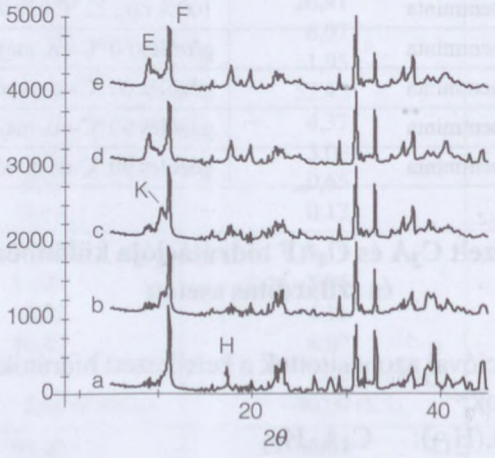
– monokarbonát: $C_3A \cdot CaCO_3 \cdot H_{12}$
– hidrogránát: $C_3A \cdot H_6$
– Friedel-só: $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot H_{10}$
– Kuzel-só: $C_3A \cdot 0{,}5CaSO_4 \cdot 0{,}5CaCl_2 \cdot H_{12}$

A gipsz nélküli mintákban (10/0 összetétel) Friedel-só 90 napos korra a 90 °C-on gőzölt mintákban volt a legintenzívebb. A Friedel-só intenzitása növekedett 180 napos korig. A sókezelés hatására a mintában a hidrogránát ($C_3A \cdot H_6$) 28 napos korra képződött mennyisége lecsökkent.

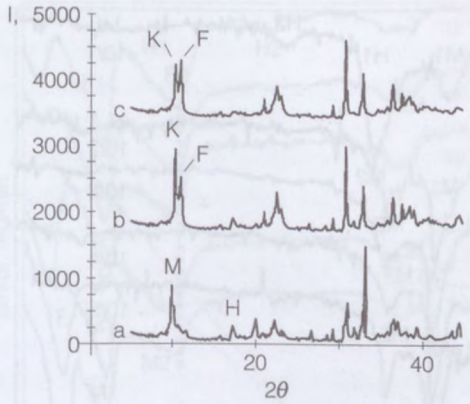
Mind Friedel-só, mind Kuzel-só keletkezett a 10/1 és 10/2 összetételű, gipsztartalmú mintákban. A Kuzel-só intenzitása volt a nagyobb. Ettringit ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot H_{32}$) és monoszulfát szintén kimutatható volt a 10/2, 10/3 10/4 és 10/5 tömegarányú C_3A: gipsz mintákban. Intenzitásuk a gipsz mennyiségének növelésével nőtt. A 10/3 és 10/4 összetételű mintákban szilárdoldat-képződés figyelhető meg. A kloridtartalmú AFm fázis ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot H_{10}$, Friedel-só) nem képez szilárd oldatot a szulfáttartalmú AFm fázissal ($C_3A \cdot 0{,}5CaCl_2 \cdot 0{,}5CaSO \cdot H_{12}$). Ez utóbbi vegyületet felfedezőjéről Kuzel-sónak nevezték el [*Kuzel* (1966), *Kuzel–Pölmann* (1990)].

Nem keletkezett Kuzel-só a 60 °C-on gőzölt 10/1 mintában. A 60 °C-on gőzölt 10/2 és 10/3 mintákban Kuzel-sót és Friedel-sót mutattunk ki. Mindkét összetétel esetén a Friedel-só intenzitása volt a kisebb. A 10/4 és 10/5 mintákban nem keletkezett Kuzel-só, azonban megjelenik a monoszulfát mint önálló fázis (*22.54. ábra*).

90 °C-on gőzölt 10/1 összetételű mintában csak Friedel-só keletkezett. A Kuzel-só csak a 10/2 mintában jelenik meg, intenzitása kétszerese a Friedel-sóénak. A 10/3, 10/4 és 10/5 mintákban a monoszulfát kis intenzitású csúcsai láthatók, míg az ettringit intenzitása növekedett a gipsz mennyiségének növelésével, valamint a minta korával (*22.55. ábra*).



22.54. ábra. 60°C-on gőzölt C_3A és gipszminták röntgen-diffraktogramjai 90 napos korban, C_3A és gipsz tömegaránya: a)–e): 10/1–10/5. *Jelölések*: F – Friedel-só, K – Kuzel-só, E – ettringit, H – hidrogránát és M – monoszulfát [*Kopecskó–Balázs* (2003)]

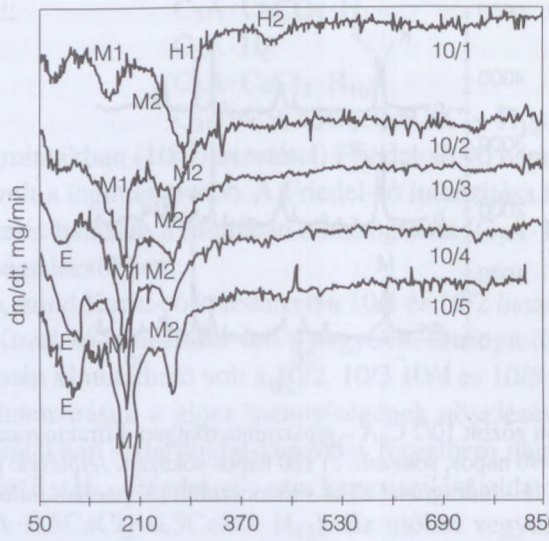


22.55. ábra. 90°C-on gőzölt 10/2 C_3A – gipszminta röntgen diffraktogramja: a) 28 napos, sókezelés előtt, b) 90 napos, sókezelt, c) 180 napos sókezelt. *Jelölések*: F – Friedel-só, K – Kuzel-só, H – hidrogránát és M – monoszulfát [*Kopecskó–Balázs* (2003)]

Sókezelés hatására a hidrogránát mennyisége lecsökkent. Hidrogránátot kis intenzitással csak a gőzöletlen 10/1, valamint a gőzölt 10/1 és 10/2 összetételű mintákban mutattunk ki. Az ettringit mennyisége 180 napos korig növekedett. Sókezelés előtt a mintákban a légköri szén-dioxid hatására monokarbo-aluminát keletkezett, tehát a szén-dioxid egy aluminát hidrátfázis által kötődött meg, míg sókezelés után ez a monokarbo-aluminát fázis nem volt megtalálható a mintákban. Helyette kalcium-karbonát észlelhető [*Kopecskó–Balázs* (2003)].

A minták derivatogramjait sókezelés után összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy a kb. 310 °C-nál megjelenő csúcs a Friedel-sóhoz tartozik. A Friedel-só teljes víztartalmának közel 40%-át kisebb hőmérséklet-intervallumban, 120–130 °C körül veszti el, a maradék víz eltávozását a nagyobb hőmérsékletű csúcs jelzi. A másik eltérés, hogy a nagy hőmérsékletű monokarbonát hőbomlásához tartozó 740 °C-os csúcs a sókezelt mintákban nem jelentkezik, helyette kisebb hőmérsékleten jelenik meg egy kettős csúcs (640 és 670 °C-on). A 740 °C-os csúcs valószínűleg a monokarbonát hőbomlásához tartozik, a 640 és 670 °C-os csúcsok pedig a kalcium-karbonát hőbomlását, valamint a szabad NaCl szublimációját jelzik. Ezek a megfigyelések összhangban vannak a röntgendiffrakciós eredményekkel. A monokarbonát keletkezésének érdekes következménye a másodlagos ettringitképződés. Kutatók megállapították, hogy a monoszulfát szén-dioxid jelenlétében nem stabil, és a karbonátcsoport kicserélődik a szulfátcsoporttal, ami másodlagos ettringitképződést eredményez [*Kuzel–Pöllmann* (1990), *Glasser–Kindness–Stronach* (1999)].

A 60 °C-on gőzölt, gipsztartalmú C_3A-minták DTG görbéit sókezelés előtt, 28 napos korban a *22.56. ábrán*, sókezelés után a *22.57. ábrán* mutatjuk be. A 10/1-es összetételnél a legnagyobb DTG csúcs 280 °C-nál a hidrogránátot jelzi. A gipsztartalom emelésével a hidrogránát mennyisége először jelentősen csökken (10/2), majd jelenléte a mintákban nem mutatható ki (10/3, 10/4 és 10/5). A 10/2–10/5 mintákban



22.56. ábra. 10/1–10/5 tömegarányú, 60 °C-on gőzölt C_3A–gipszminták DTG görbéi 28 napos korban, sókezelés előtt. *Jelmagyarázat*: E – ettringitből származó tömegveszteség, M1 és M2 – a monoszulfát kétlépcsős ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{12}$) vízvesztése, F1 és F2 – a Friedel-só kétlépcsős ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot H_{10}$) vízvesztése, K – Kuzel-só ($C_3A \cdot 0{,}5CaSO4 \cdot 0{,}5CaCl_2 \cdot H_{10}$) vízvesztése [*Kopecskó–Balázs* (2003)]

a gipsztartalom növelésével egy másik fázis, a monoszulfát dehidratációjából származó csúcs válik egyre intenzívebbé (190 °C). A 260 °C-nál megjelenő csúcs a monoszulfát vízvesztésének második lépcsőjéhez tartozik és nem a hidrogránáthoz.

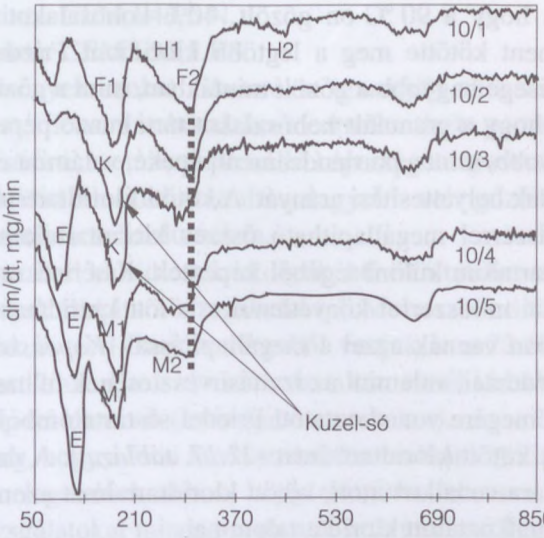
Amennyiben a derivatográfiás mérés számos, tömegveszteséggel is járó hőreakciót (DTG és DTA csúcsokat) mutat, nehéz az egyes fázisok mennyiségének számítása. A Friedel-só mennyiségét a 290–330 °C hőmérséklet-intervallumban bekövetkező tömegvesztésből számoltuk.

A derivatográfiás eredmények, egybevetve a röntgendiffrakciós eredményekkel, jelzik, hogy

– a Friedel-só és a hidrogránát derivatográfiás vízvesztésének egy része ugyanabban a hőmérséklettartományban megy végbe (hidrogránát a 10/0, 10/1 és 10/2 mintában volt jelen),
– a röntgendiffraktogramok alapján sókezelés után a 10/1 és 10/2 mintában a monoszulfát teljesen eltűnt, helyette Kuzel-sót észleltünk.

A Kuzel-só termoanalitikai adatainak hiányában, ebben a tanulmányban nem vállalkoztunk a Kuzel-só mennyiségi számítására.

Mind a gőzöletlen, mind a gőzölt mintákban a Friedel-só számított mennyisége csökkenő tendenciát mutat a gipsz mennyiségének növelésével (*22.15. táblázat*). Megállapítottuk, hogy a gőzölt mintákban több Friedel-só keletkezett, mint a természetes szilárdulású mintákban. A Kuzel-só képződése a kémiailag kötött kloridiontartalom további növekedését eredményezi [*Kopecskó–Balázs* (2004)].



22.57. ábra. 10/1–10/5 tömegarányú, 60 °C-on gőzölt C_3A–gipszminták DTG görbéi 90 napos korban, sókezelt minták. *Jelmagyarázat*: E – ettringitből származó tömegveszteség, M1 és M2 – a monoszulfát kétlépcsős ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{12}$) vízvesztése, F1 és F2 – a Friedel-só kétlépcsős ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot H_{10}$) vízvesztése, K – Kuzel-só ($C_3A \cdot 0{,}5CaSO_4 \cdot 0{,}5CaCl_2 \cdot H_{10}$) vízvesztése [*Kopecskó–Balázs* (2003)]

22.15 táblázat. A Friedel-só ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot H_{10}$) termogravimetrikus tömegveszteségekből számított mennyisége sókezelt C_3A-, illetve C_4AF-tartalmú mintákban, 90 napos korban, m%

A C_3A, ill. C_4AF és gipsz tömegaránya	Gőzöletlen minták		60 °C-on gőzölt minták		90 °C-on gőzölt minták	
	C_3A	C_4AF	C_3A	C_4AF	C_3A	C_4AF
10/0	18,2	19,0	23,1	14,0	26,9	13,9
10/1	21,4	18,2	23,2	17,5	28,0	22,5
10/2	26,3	16,5	31,4	18,0	30,4	19,9
10/3	16,1	15,4	29,6	17,1	25,1	19,2
10/4	14,3	11,0	23,5	15,4	21,9	18,6
10/5	13,8	10,2	18,2	14,4	20,8	15,6

22.6.4.3. A cementek kloridion-megkötő képessége

Kísérleteinkben tanulmányoztuk a gőzölés hatását a kloridion-megkötő képességre olyan cementek esetében, melyek különböző mennyiségben tartalmazzák a C_3A és C_4AF klinkerásványokat (*22.14. táblázat*).

A röntgendiffrakciós eredmények Friedel-só keletkezését igazolják. Kuzel-sót nem tudtunk kimutatni ezekben a sókezelt mintákban. A *22.15. táblázat* bemutatja a Friedel-só mennyiségét, melyet a derivatogramok termogravimetrikus tömegveszteségéből számoltunk.

Azt tapasztaltuk, hogy a 90 °C-on gőzölt, 40% kohósalakot tartalmazó CEM III/A 32,5 MS cement kötötte meg a legtöbb kloridiont Friedel-só formájában. A Friedel-só mennyisége nagyobb a gőzölt mintákban, mint a gőzöletlenekben. Kutatók megfigyelték, hogy a granulált kohósalakot tartalmazó pépek kloridion-megkötő képessége nagyobb, mint a portlandcementpépeké, valamint ez a különbség nő, ha növelik a kohósalak helyettesítési arányát. A kötött kloridtartalom mennyiségét a nedves kémiai módszerrel megállapítható összes kloridtartalom és a vízoldható (nem kötött) kloridtartalom különbségéből képezték. Kísérleti eredményeink, melyeket termoanalitikai módszerrel közvetlenül a kötött kloridtartalom elemzéséből nyertünk, összhangban vannak ezzel a megállapítással [*Kopecskó–Balázs* (2005)].

A *22.16. táblázat* adatai, valamint az izzítási veszteségek felhasználásával kiszámítottuk a minták tömegére vonatkoztatott Friedel-só-tartalomból az izzítási maradékra vonatkoztatott kötött kloridtartalmat (*22.17. táblázat*). A derivatográfiás mérés izzítási maradékára vonatkoztatott, kötött kloridtartalmat azonosnak tekintjük a cement tömegére vonatkoztatott kloridtartalommal.

22.16 táblázat. A $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot H_{10}$ (Friedel-só) mennyisége a sókezelt mintákban, termogravimetrikus tömegveszteségekből számolva, a minták kora 56, 90 és 180 nap, m%

Cement	20 °C-on szilárdult			60 °C-on gőzölt			90 °C-on gőzölt		
	56 nap	90 nap	180 nap	56 nap	90 nap	180 nap	56 nap	90 nap	180 nap
	Friedel-só mennyisége a cementpép mintákban, m%								
1. cement	3,61	5,34	4,52	2,91	5,67	5,04	6,97	4,78	5,88
2. cement	6,14	7,12	7,07	–	8,94	9,26	9,72	9,31	9,78
3. cement	3,28	4,21	4,06	3,69	4,37	4,36	4,47	5,15	5,62

22.17. táblázat. A kémiailag kötött kloridion-tartalom a $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot H_{10}$ (Friedel-só) tartalomból számolva és az izzítási maradékra vonatkoztatva, a minták kora 56, 90 és 180 nap, m%

Cement	20 °C-on szilárdult			60 °C-on gőzölt			90 °C-on gőzölt		
	56 nap	90 nap	180 nap	56 nap	90 nap	180 nap	56 nap	90 nap	180 nap
	A kötött kloridion tartalom a cement tömegére vonatkoztatva, m%								
1. cement	0,60	0,89	0,76	0,47	0,90	0,84	1,13	0,90	0,98
2. cement	0,96	1,18	1,18	–	1,45	1,51	1,62	1,55	1,60
3. cement	0,51	0,66	0,63	0,50	0,68	0,76	0,71	0,82	0,93

A *22.17. táblázatból* levonható következtetések:

a) A cementek kötött kloridion-tartalma csökkenő sorrendben mind természetes szilárdulás és gőzöléses szilárdítás esetén és tetszőleges korban (180 napos korig vizsgálva):

– 2. cementminta: CEM III/A 32,5 N (40% kohósalak-tartalommal),

– 1. cementminta: CEM I 42,5 N,
– 3. cementminta: CEM I 32,5 RS.

Ezek az eredmények azokat a kutatókat igazolják, akik szerint a kohósalakportlandcement, illetve a kohósalakcementnek a tiszta portlandcementénél nagyobb sókorrózióval szembeni ellenálló képességét tapasztalták.

b) A cementek kötött kloridion-tartalma nagyobb volt gőzölt minták esetében, mint a természetesen szilárdulóéban.

c) A korróziót a szabad kloridionok okozzák. Mivel általában az összes kloridtartalmat meg tudjuk állapítani vizsgálattal (pl. Mohr szerinti titrálással), azt javasoljuk, hogy az összes kloridtartalomból vonjuk le a *22.17. táblázat* szerinti kötött kloridtartalmat. Ha a kloridion-tartalom ennél kisebb, akkor feltételezhetően nem lép fel korrózió (a vizsgált cementekre).

d) Úgy ítéljük meg, hogy a fenti módszerünk használható. A kísérleti eredmények azonban nem elegendőek ahhoz, hogy előírásba lehessen foglalni. Érdemes lenne ezen vizsgálatokat minden cementre kiterjeszteni. Így állást lehetne foglalni a sózásálló cementek kérdésében.

22.6.5. Összefoglalás

A múlt század eleje óta ismert, hogy a betonba készítéskor belekevert $CaCl_2$-ot a cement C_3A klinkerásványa Friedel-só ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) formájában megköti. Azt is tudjuk, hogy csak a szabad, pórusoldatban lévő, kémiailag nem kötött kloridion okozza az acélbetét korrózióját.

A közutak téli jégmentesítő sózása új problémát vetett fel. Azt tudjuk, hogy a betonba kevert $CaCl_2$-ot megkötheti a cement, alapkísérleteinkkel azt is bizonyítottuk, hogy a megszilárdult betonba a kapilláris pórusokon át behatoló NaCl kloridionját a cement kalcium-aluminát klinkerásványai ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$), illetve vas-analógja ($C_3F \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) formájában szintén megkötheti. A kutatást a C_6AF_2 és C_6A_2F kalcium-aluminát-ferrit klinkerásványokra is kiterjesztettük. A kloridkötést különböző típusú gyári cementeken is bizonyítottuk.

Világviszonylatban sok kutatás foglalkozott a kloridionok okozta korrózióval. A kutatásnak két fő iránya volt:

– Az egyik csoport kutatta azt a kloridion-tartalmat, amelynél a korrózió megkezdődik (kritikus korróziót kiváltó kloridion-tartalom). Ismertettük ezen a kutatásokat. Még sok a bizonytalanság.
– A kutatók másik csoportja (ebbe a csoportba tartoznak a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék kutatásai is) kutatta a kloridkötés feltételeit, mivel a megkötött kloridion nem okoz korróziót. Egyrészt C_3A és C_4AF klinkerásványokat vizsgáltunk, modellezve a téli sózást, és változtatva a klinkerásvány-gipsz arányt. Majd kiválasztottunk 3, egymástól lényegesen eltérő ásványi összetételű

cementet. Három különböző szilárdítási módot alkalmaztunk: természetes szilárdulást, gőzérlelést 60, illetve 90 °C hőmérsékleten. A megszilárdult cementpépmintákat sókezelésnek tettük ki, modellezve a téli jégmentesítő sózást. A keletkezett hidrátokat röntgendiffraktométerrel és derivatográffal elemeztük. Meghatároztuk a keletkezett Friedel-só mennyiségét, és ennek alapján úgy ítéltük meg, hogy a cementek kloridion-megkötő képessége csökkenő sorrendben a következő:

- CEM III/A 32,4 N,
- CEM I 42,5 N,
- CEM I 32,5 RS.

23. Vízzáró beton

23.1. Fogalma és a vízzáró beton felhasználási területe

[*Kiss* (1987), *Németh* (2004), *Balázs* (1968, 1984), *Ujhelyi* (2005)]

Akkor neveztük a betont vízzárónak, ha a belőle készített próbatestek az MSZ 4715-3:1972 szabvány szerint megvizsgálva az MSZ 4719:1982 szerinti vízzárósági csoportba voltak sorolhatók. Napjainkban a beton vízzáróságát az MSZ EN 12390-8:2001 szabvány szerint kell vizsgálni, és a betont az MSZ 4798-12004 szabvány figyelembevételével kell vízzárósági osztályba sorolni.

A vízzáróság vizsgálata szerepel a 3.4.4.3. fejezetben. A vízzárósági csoportba sorolást a *23.1.* és a *23.2. táblázat* tartalmazza.

A vizsgálat során a próbatestet úgy kell készíteni, hogy a víznyomás iránya és a bedolgozás iránya úgy viszonyuljon egymáshoz, mint az építmény esetében.

Ennek a vizsgálatnak hiányossága az, hogy csak a vizsgálat befejeztével tájékozódunk a vízbehatolás mélységéről, de a víz előrehaladása sebességéről nem.

23.1. táblázat. A beton mint anyag MSZ 4719 szerinti vízzárósági csoportjai
[MÉASZ ME-04.19:1995 8. fejezet Vízzáró betonok]

Vízzáró beton		Vízzárósági követelmény az MSZ 4715-3 szerint vizsgálva	
VZ2	gyengén vízzáró	2 bar	víznyomásnak ellenálló beton
VZ4	mérsékelten vízzáró	4 bar	
VZ6	vízzáró	6 bar	
VZ8	különlegesen vízzáró	8 bar	

23.2. táblázat. Vízzáró beton- és vasbeton szerkezetek jelölése és követelménye az MSZ 4798-1:2004 figyelembevételével

Vízzárósági osztály jele	Alkalmazási terület	A környezeti osztály jele	A beton nyomószilárdsági osztálya, legalább, tájékoztatás	A beton cementtartalma, legalább, kg/m³	A beton víz–cement tényezője, legfeljebb	Friss beton levegőtartalma, legfeljebb térfogat%
VZ60	Vízzáró beton	XV1(H)	C25/30	300	0,60	1,0
VZ40	Fokozottan vízzáró beton	XV2(H)	C30/37	300	0,55	1,0
VZ20	Igen vízzáró beton	XV3(H)	C30/37	300	0,50	1,0

Az Építőanyagok Tanszéken a víz előrehaladásának a sebességét nyitott izotópokkal vizsgáltuk, és jó eredményeket értünk el. E célra megfelelőnek találtuk a J 131 jelű *izotópot,* amelynek felezési ideje 8,7 nap, aktivitása 12,5 m Ci, Gamma-energiája 0,364 me V, jelzése J-RA-1, vegyület Na. J.

Az építőipari gyakorlatban a fenti szabványos vizsgálattól eltérően vízzárónak nevezik a betont, ha a víznyomással ellentétes oldalról a szerkezeten az átszivárgó víz természetes körülmények között el is párolog. Ez a meghatározás nem egyértelmű, mivel az elpárolgás lehetősége függ a környezet légnedvesség-tartalmától is.

Pontosabb a meghatározás, ha a vízzáróság mértékét az *eltávozott víz mennyiségével* fejezzük ki.

A beton- és vasbeton *szerkezeteket* (tehát nem az MSZ 4798-1:2004 szerinti betonokat) vízzáróságuk alapján három csoportba sorolhatjuk:

- *Mérsékelten vízzáró* az a beton vagy vasbeton szerkezet, esetleg vakolt szerkezet, amelynek 1 m^2 felületén a legnagyobb üzemi víznyomásra – 24 óra alatt – legfeljebb 0,4 liter víz szivárog át.
- *Vízzáró* az a beton- vagy vasbeton szerkezet, esetleg vakolt szerkezet, amelynek 1 m^2 felületén a legnagyobb üzemi víznyomás hatására, 24 óra alatt legfeljebb 0,2 liter víz szivárog át. Szabadban, vagy jól szellőzött helyiségben ez a vízmennyiség általában elpárolog a felületről (azaz átnedvesedés nem észlelhető).
- *Különlegesen vízzáró* az a beton- vagy vasbeton szerkezet, esetleg vakolt szerkezet, amelynek 1 m^2 felületén a legnagyobb üzemi víznyomás hatására 25 óra alatt legfeljebb 0,1 liter víz szivárog át.

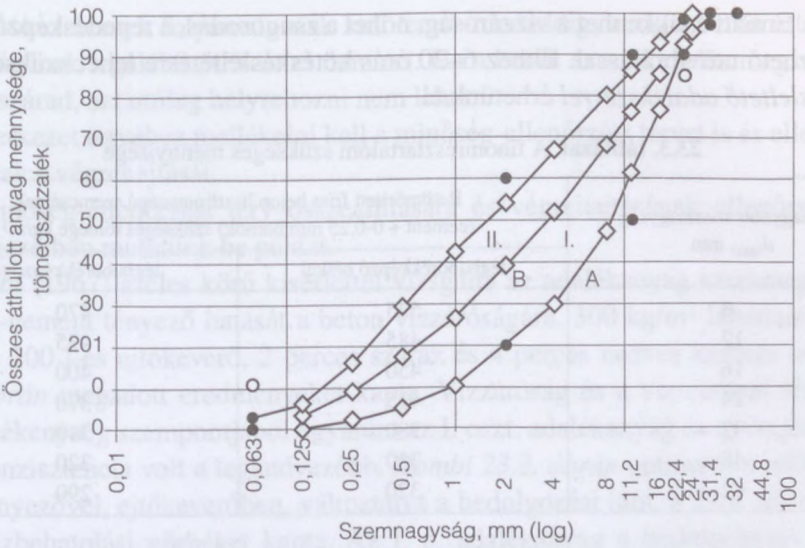
Pl. egy megépített víztartályra vonatkozóan átlagos átszivárgási értéket kaphatunk úgy, hogy a tartályt vízzel feltöltjük, a felületen a víz elpárolgását megakadályozzuk, és mérjük a víznívó csökkenését. A víznívó csökkenéséből számítható elpárolgott vízmennyiséget osztjuk a tartály vízzel érintkező betonfelületével. Szerkeszthető olyan berendezés is, amellyel m^2-ként megállapítható az elszivárgott víz mennyisége.

Vízzáró betonból készítendő szerkezetek: vízépítési létesítmények (víztornyok, medencék, gátak, zsilipek stb.) víz-, szennyvízelvezető csövek, csatornaszerkezetek, közműalagutak, pincék vasbeton falai, agresszív hatásnak kitett beton- és vasbeton szerkezet stb.

23.2. A vízzáró beton anyagai

[*Balázs* (1968,1984), *Ujhelyi* (2005), *Kiss* (1987), *Balázs–Kelemen–Kilián–Sárosi* (1958)]

A vízzáró beton előállításához valamennyi szabványos cementünk alkalmas. A hidraulikus pótlékot és a kiegészítő anyag tartalmat érdemes korlátozni (granulált kohósalak legfeljebb 40, trasz és pernye legfeljebb 25, kovasavliszt legfeljebb 10, mészkőliszt legfeljebb 20 m% lehet).



23.1. ábra. Beton-adalékanyagok szemmegoszlásának határgörbéi
Legnagyobb szemnagyság: 24 mm (MSZ 4798-1:2004, példa a határgörbékre) NAD M5 ábra

A betonok vízzárósága elsősorban a beton tömöttségétől függ, ezért fontos, hogy a legnagyobb szemnagyság függvényében legyen elég lisztfinomságú (< 0,25 mm) szemcse.

Az adalékanyag legnagyobb szemnagysága a falvastagság mintegy egynegyede legyen. Fontos szerepe van a szemalaknak is.

A szemmegoszlási görbe közelítse meg B határgörbét (l. 2.3.3.1 fejezetet és egy példa a *23.1. ábrán*).

Ezt rendszerint csak úgy érhetjük el, ha a homokot legalább két frakcióra (0–1 és 1–5 mm) bontjuk. Az adalékanyag finomsági modulusa az ún. optimális finomsági modulusnak kb. 0,9-szerese legyen. Egyes szakemberek a vízzáró betonhoz szükséges homok finomrésztartalmát (< 0,20 mm) ugyanúgy adják meg, mint a cementtartalmat.

Az adalékanyag ne legyen szennyezett. A homok *agyag-iszaptartalma* 3, a kavicsé 0,5 térfogatszázaléknál több ne legyen.

Természetes adalékanyagainkból általában hiányzik a finom szemcse. Ahhoz, hogy a *23.3. táblázat* szerinti finomrésztartalmat megközelíthessük, a hiányt pótolni kell. Erre alkalmas pl. a mészkőliszt [*Zsigovics–Berecz* (1999)].

A vízzáró beton készítéséhez előnyösek az adalékszerek. A *tömítő adalékszerek* lezárják a kapilláris pórusokat és víztaszítóvá teszik a pórusfalakat, ezáltal fokozzák a vízzáróságot. A *képlékenyítő és a folyósító adalékszerek* lehetővé teszik a víz-cement tényező csökkentését adott konzisztencia esetén. Ha a vízzáró betonnak fagyállónak is kell lennie, szükség lehet *légbuborékképző adalékszerek* használatára. Képlékeny vagy folyós konzisztenciájú beton hajlamos lehet a tömörítés utáni üle-

pedésre. Emiatt csökkenhet a vízzáróság, nőhet a zsugorodás, a repedésképződés. Ez megelőzhető utóvibrálással. Ehhez 6–20 órás kötéskésleltetésre lehet szükség, amit *kötéskésleltető adalékszerrel* érhetünk el.

23.3. táblázat. A finomrésztartalom szükséges mennyisége

Legnagyobb szemnagyság d_{max}, mm	Betömörített friss beton lisztfinomságú szemcséinek (cement + 0-0,25 mm homok) szükséges tömege kg/m³	
	légbuborékképző nélkül	légbuborékképzővel
8	525	470
12	485	435
16	450	400
24	415	370
32	380	340
48	350	320
62	320	290

A *bentonit* montmorillonit tartalmától és egyéb tényezőktől függően száraz térfogatának többszörösére duzzad (Ca-bentonit kb. háromszorosára, a Na-bentonit kb. tízszeresére) és ezáltal a pórusokat elzárja. A cement tömegére vonatkoztatott 1 m%-nál több bentonit azonban csökkenti a beton szilárdságát. Nehéz egyenletesen a betonba juttatni, és ha a beton váltakozva kiszárad és vízzel telítődik, lassan kimosódhat a betonból. Folyadéktartályok esetén sikerrel alkalmazható az a módszer, hogy a próbaüzemeltetés során bentonitot is tartalmaz a víz, és a vizet állandóan mozgatják. A pórusokat a vízzel kiszivárgó bentonit lassan eltömheti.

23.3. Beton- és építéstechnológia

[*Kiss* (1987), *Németh* (2004), *Józsa–Csányi* (2006), *Csányi–Józsa–Varga* (2006), *Ujhelyi* (2005), *Zsigovics–Berecz* (1999), *Dombi* (1967)]

A beton összetételét úgy kell megválasztani, hogy a beton jól bedolgozható legyen, szétosztályozódás- és repedésmentes betont készíthessünk. A beton összetételre tájékoztató adatokat a *23.2. táblázatból* vehetünk.

Lehetőleg földnedves, gyengén képlékeny betont készítsünk. Általában a vízszintes szerkezetek készíthetők földnedves betonból, míg a függőleges vagy ferde szerkezetekbe csak képlékeny beton dolgozható be.

Ha képlékeny (esetleg folyós) konzisztenciájú betont kell készíteni, akkor a konzisztenciát képlékenyítő, folyósító, kötéskésleltető adalékszerrel lehet elérni.

Gyakran támasztunk egyéb követelményt is a vízzáróságon kívül. Akkor az eltérő követelményeket a tartósság szempontjából kell mérlegelni.

A betont a konzisztenciához illő tömörítő eszközökkel folyamatosan kell bedolgozni.

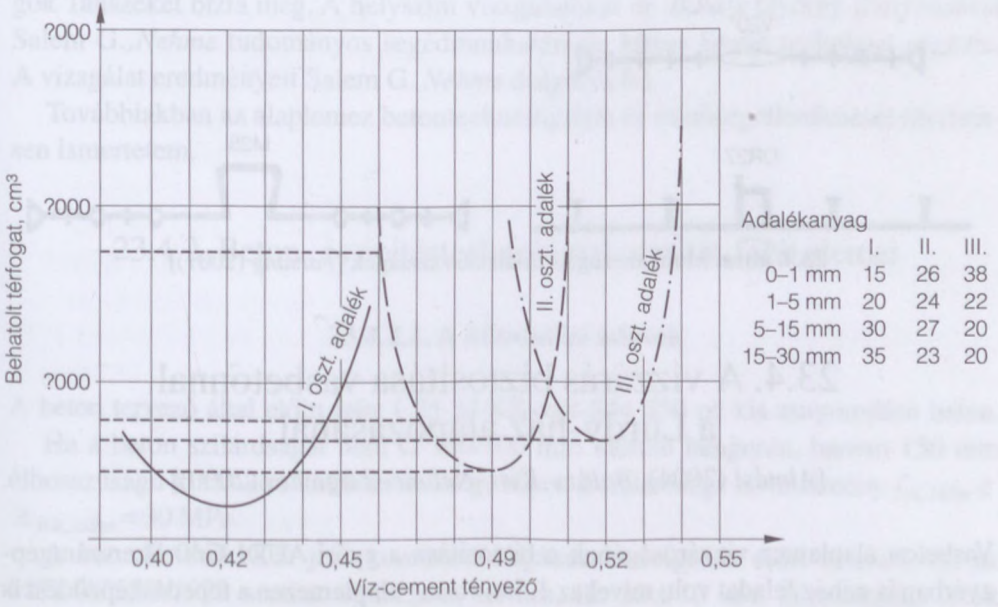
Az utókezelésnek folyamatosnak kell lenni mindaddig, amíg a beton a tervezett szilárdságának legalább 50%-át el nem éri. Ha a beton az utókezelés megszakítása miatt kiszárad, azt utólag helyrehozni nem lehet.

A szerkezet tervéhez mellékelni kell a minőség-ellenőrzési tervet is és ellenőrizni kell annak a végrehajtását.

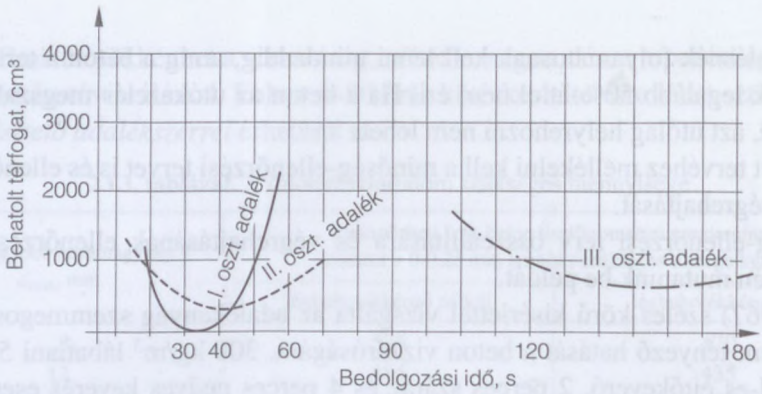
A minőség-ellenőrzési terv összeállítására és végrehajtásának ellenőrzésére a 23.4. fejezetben mutatunk be példát.

Dombi (1967) széles körű kísérlettel vizsgálta az adalékanyag szemmegoszlása és a víz-cement tényező hatását a beton vízzáróságára. 300 kg/m^3 lábatlani 500-as cement, 100 l-es ejtőkeverő, 2 perces száraz és 4 perces nedves keverés esetére a *23.2. ábrán* megadott eredményeket kapta. Vízzáróság és a víz-cement tényezőre való érzékenység szempontjából egyaránt az I. oszt. adalékanyag és gyengén képlékeny konzisztencia volt a legkedvezőbb. *Dombi 23.2. ábrán* optimumot adó víz-cement tényezővel, ejtőkeverőben, változtatva a bedolgozási időt, a *23.3. ábrán* megadott vízbehatolási görbéket kapta. Az I. o. adalékanyag a bedolgozásra nagyon érzékeny, ezért a II. o. adalékanyag mondható kedvezőbbnek.

A vízzáró szerkezet készítése során fontos a munkahézagok és a hézagzárás gondos megtervezése és megépítése. A munkahézagot úgy kell megtervezni, hogy az a vasbeton szerkezet egységes működését ne zavarja. Helyét lehetőleg úgy kell megválasztani, hogy a betonban a terv szerint ne legyenek húzóerők. Ennek megfelel keretek, többtámaszú lemezek esetén, ha a munkahézagot az acélbetétek felhajlítása helyén képezik ki.



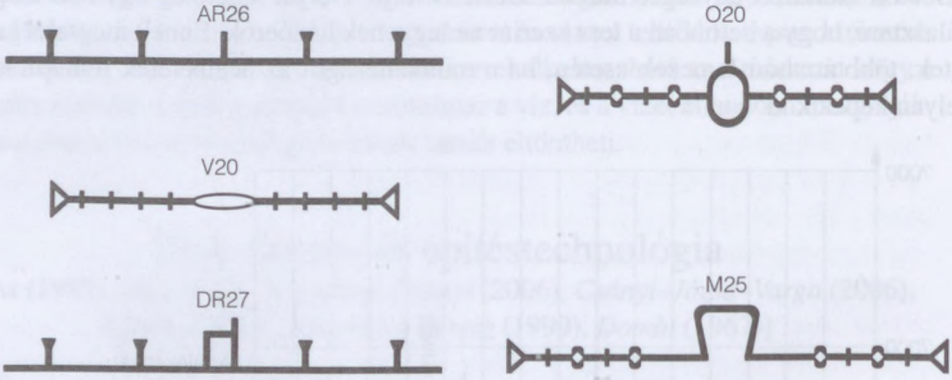
23.2. ábra. Az adalékanyag szemmegoszlásának és a víz-cement tényezőnek a hatása a beton vízzáróságára [(*Dombi* (1967)]



23.3. ábra. A bedolgozási idő hatása a beton vízzáróságára [(*Dombi* (1967)]

A betonfedést érdemes a szokásoshoz képest 10 mm-rel megnövelni és igen gondosan kell a betont tömöríteni.

A beton készítéséhez betonozási tervet és minőség-ellenőrzési tervet kell készíteni. *Farsang* (2003, 2007) *Vízzáró betonok épületszerkezeti megoldásait* ismerteti. Ebből a Sika Hungária Kft. által gyártott munkahézagokat és dilatációs szalagokat szemléltetem a *23.4. ábrán.*



23.4. ábra. Munkahézag és dilatációs szalagok [*Farsang* (2007)]

23.4. A vízzárás biztosítása vasbetonnal a Lurdy-ház alapozásánál

[*Almási* (2004), *Balázs–Kiss–Nehme–Zsigovics* (2000)]

Vasbeton alaplemez vízzáróságának a biztosítása a győri AUDI G40 Szerszámgépgyárban is nehéz feladat volt, mivel az 1,5 m vastag alaplemezen a repedésképződést is meg kellett előzni. [*Kaszóné Szőnyi* É.–*Kovács* J. (2005)]. Továbbiakban talán még nehezebb feladat megoldását, a Lurdy-ház alaplemezének betonozását ismertetem.

23.4.1. Bevezetés

A Lurdy-ház bevásárlóközpont és élménycentrum – építése idején – hazánk legnagyobb ilyen célú épülete volt. Az épület alaplemezét monolit vasbetonból készítették, míg többi része túlnyomórészt előre gyártott. Az alaplemezek tervezése, betontechnológiája és minőség-ellenőrzése azért érdemli meg az ismertetést, mert különleges követelményeket támasztottak a betonnal szemben és a monolit alaplemezből 41 nap alatt 18513 m^3-t kellett elkészíteni meleg nyári időszakban (1997. július–szeptember).

A Lurdy-ház üzletközpont a budapesti Könyves Kálmán krt. és a Mester utca sarkán lévő épület.

Beruházó a Lurdy-ház Beruházási Kereskedelmi Kft. volt.

A tartószerkezetet CAEC Cronauer Almási Engineering Consulting Kft., az alaplemezt *Almási* József, *Sterner* Pál, *Kiss* Mária tervezte.

Az egész épület létesítésére WA-AVA Közkereseti Társaságot hozták létre. Az alaplemezt a VEGYÉPSZER Rt. Építési Divízió építette, dr. *Kiss* Jenő igazgató, *Tóth* Z. Lajos főmérnök, *Kiss* Imre építésvezető és *Molnár* Tamás beosztott építésvezető irányításával.

A beton- és építéstechnológiai utasítást és a műszaki követelményrendszert dr. *Balázs* György ny. egyetemi tanár készítette és dr. *Zsigovics* István egy. adjunktus ellenőrizte, mindketten a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék dolgozói.

A VEGYÉPSZER Rt. a saját (vállalati) minőségellenőrzéssel a BME Építőanyagok Tanszékét bízta meg. A helyszíni vizsgálatokat dr. *Balázs* György irányításával Salem G. *Nehme* tudományos segédmunkatárs és *Mikes* István technikus végezte. A vizsgálat eredményeit Salem G. *Nehme* dolgozta fel.

Továbbiakban az alaplemez betontechnológiáját és minőségellenőrzését részletesen ismertetem.

23.4.2. Beton- és építéstechnológiai utasítás főbb elemei

23.4.2.1. A kiindulási adatok

A beton tervező által előírt jele: C25-24/KK-vz4-S54 350 pc kis zsugorodású beton.

Ha a beton szilárdságát nem Ø 150/300 mm méretű hengeren, hanem 150 mm élhosszúságú kockákon határozzák meg, akkor a szilárdsági követelmény $f_{ci,\,cube} \geq$ $\geq f_{ck,\,cube} = 30$ MPa.

A betonkeverék KK jelű konzisztenciájának bedolgozás előtt közvetlenül az MSZ 4713/3:1972 szerint 40 ± 2 cm, terülés, ill. 30 ± 10 mm kúproskadás felelt meg.

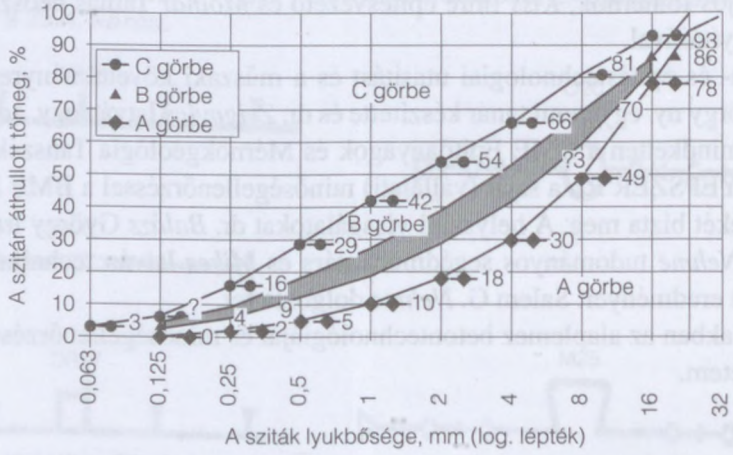
23.4.2.2. Az alapanyagokra vonatkozó követelmények

Az alapanyagokra a következőket írták elő:

Az S-54 350 pc jelű *cement* minősége feleljen meg az MSZ 4702/4-82 szerinti követelményeknek. Fajlagos felülete – Blaine szerint – 350 m^2/kg-nál kisebb legyen. A cement hőmérséklete felhasználáskor ne legyen 50 °C-nál nagyobb.

Magyarázat: A tervező elsősorban a gyengén agresszív talajvíz miatt választotta a szulfátálló cementet. De a hidratációhő (tehát a repedésérzékenység) szempontjából is legkedvezőbb tiszta portlandcementünk. A cement fajlagos felületét a cementszabvány nem köti meg. A fajlagos felület felső határát azért adtuk meg, mert a fajlagos felület nagy hatással van a hidratációhőre [*Balázs* (1987)].

A betonhoz osztályozott és mosott kvarcalapú természetes (nem tört) *adalékanyagot* kell használni. Az adalékanyag szemmegoszlása – szivattyúzott betont feltételezve – essék a *23.5. ábrán* megadott határgörbék közé. Az adalékanyag legalább 0/4 mm-es homokfrakcióból (ez nélkülözhetetlen) és 4/32 mm között két vagy három kavicsfrakcióból álljon.



23.5. ábra. Az előírt szemmegoszlási határgörbék [*Balázs–Kiss–Nehme–Zsigovics* (2001)]

Az adalékanyag szennyezettség szempontjából feleljen meg az MSZ 18293:1979 szerint az agyag-iszaptartalom alapján a P besorolásnak és a TT tisztasági osztálynak.

A 0,25 mm-nél kisebb homokszemcsék és a cement együttes mennyisége legalább 415 kg/m^3 legyen.

A beton készítéséhez – szükség szerint – adalékszert kell használni.

Az adalékszerek összeférhetőségére a gyártótól kell nyilatkozatot kérni. Az adalékszer hatása mértékét kísérlettel kell ellenőrizni.

23.4.2.3. A beton összetétele

Az épület vonalas alaprajzát és betonozási ütemeit a *23.6. ábra,* jellegzetes függőleges metszeteit a *23.7. ábra* szemlélteti. A közel négyszög alakú 4 fő épületrész közül az A, B, C azonos elrendezésű, belső udvaros kialakítású. Ugyanakkor a D épület nagy belmagasságú. Az A, B, C rész egy dilatációs egységet képez, a D épületrész különálló. Az építmény térszint alatti részének befoglaló mérete kb. 164 × 164 m. A négyszög alapú épületrészek (A, C) 75 × 90 m, köríves B épületrész 82 × 82 m.

A magas talajvíz miatt a hagyományos fekete szigetelést ajánlották. Mivel a gépkocsi tárolása során nem követelmény a porszárazság, a tervezők a vízzárást kis repedéstágasságú (0,15 mm), a fokozott vízzárási követelményt teljesítő tömegbetonnal oldották meg.

Almási József (2004) a tervezés tapasztalatait következőképpen foglalta össze.

Nagy kiterjedésű, 100 m-nél nagyobb oldalhosszúságú építmények monolit vasbeton tömb alappal kombinált alaplemeze dilatációs hézagok nélkül is megvalósítható az alábbi szempontok részletes vizsgálata és elemzése útján:

- számításba kell venni az építés alatti hőmérsékleti viszonyokat,
- a különböző terhelésű lemezrészek összekapcsolhatók, ha azokat azonos süllyedésre méretezzük,
- a vasalás mennyiségének meghatározása során figyelembe kell venni a zsugorodásból, a kötéshőből származó húzófeszültségeket,
- a betontechnológia részletes előírása során kis zsugorodású és kötéshőjű cementet alkalmazzunk.

A dilatáció nélküli kb. 30 cm-nél vastagabb vasbeton alapozási szerkezet esetében a vízzárás tömegbetonnal – külön szigetelés nélkül – a következőképpen érhető el:

- az alaplemez alatt biztosítani kell a terület eredeti vízháztartását, a rétegvizek szabad áramlását,
- a betonozási sorrend, illetve az építési egységekre való bontás során figyelembe kell venni a rétegvizek áramlási irányát,
- meg kell oldani az alapozási szerkezet alatt áramló vizek összegyűjtését és megfelelő befogadóba való bevezetését.

A felsorolt feltételekkel nagyméretű épületek szigetelés nélküli vízzárása megoldható.

A beton összetétele:

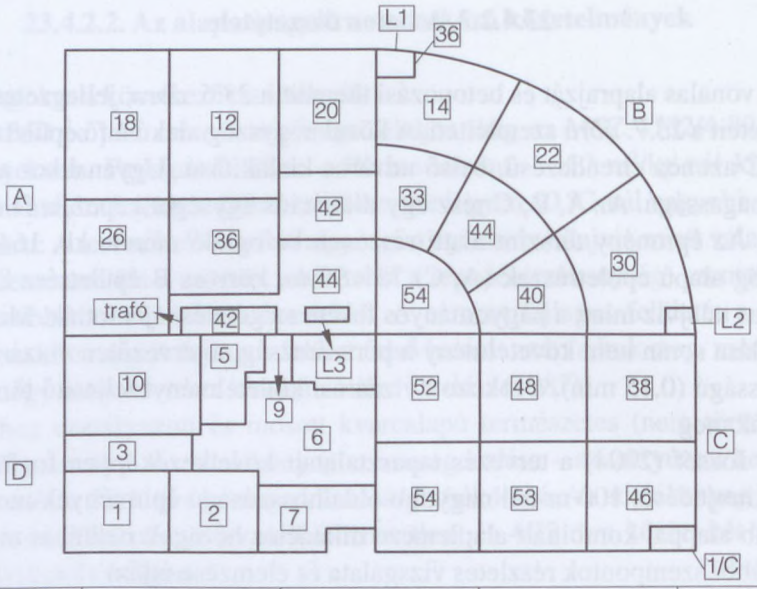
340 kg/m^3 S54 350 pc

160 kg/m^3 víz + adalékszer

1900 kg/m^3 adalékanyag

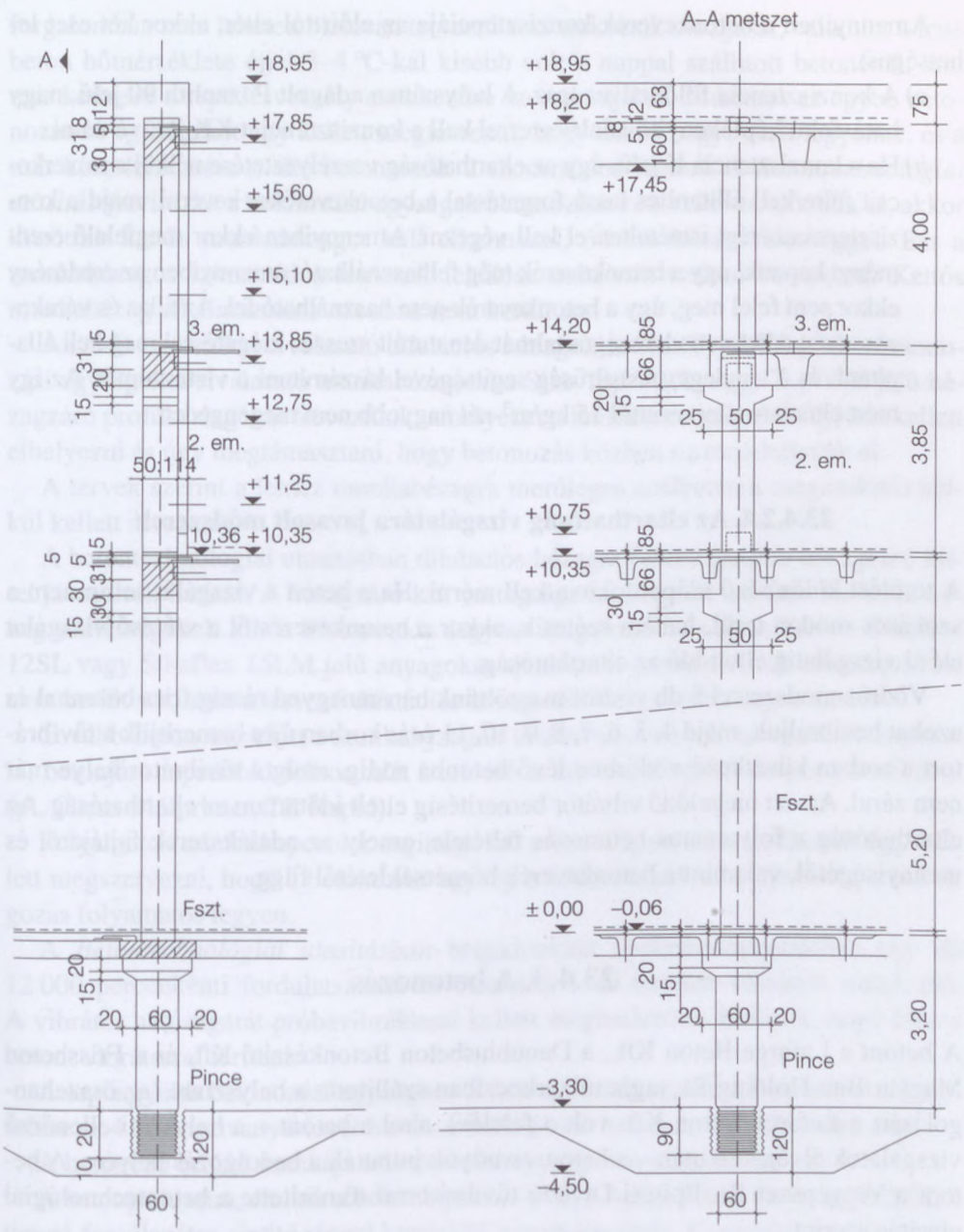
A friss beton testsűrűsége: 2400 kg/m^3.

A betonösszetétel a száraz adalékanyagra vonatkozik.



Betonozási alkalom	Dátum	Szekció	m²	m³
12	1997. 08. 07.	A	940	384
14	1997. 08. 10.	B	837	335
18	1997. 08. 13.	A	902	370
20	1997. 08. 14.	A	775	310
22	1997. 08. 15.	B	815	326
26	1997. 08. 18.	A	1225	490
30	1997. 08. 21.	B	866	346
33	1997. 08. 23.	B	973	389
36	1997. 08. 25.	A, L1	926	371
38	1997. 08. 26.	C	1139	362
40	1997. 08. 28.	B, L3	1007	400
42	1997. 08. 29.	A	733	293
44	1997. 09. 01.	B, C	1333	567
46	1997. 09. 02.	C, L2	1229	493
48	1997. 09. 03.	C	1033	413
52	1997. 09. 06.	C	904	362
53	1997. 09. 07.	C	986	395
54	1997. 09. 09.	B	1027	411
55	1997. 09. 10.	C	863	346
1	1997. 11. 12.	D		286
2	1997. 11. 12.	D		292
3	1997. 11. 26.	D		228
4	1997. 12. 22.	D		65
5	1998. 01. 11.	D		198
6	1998. 01. 16.	D		305
7	1998. 01. 21.	D		282
8	1998. 02. 10.	D		188
9	1998. 02. 14.	D		64
10	1998. 06. 16.	D		314

23.6. ábra. A Lurdy-ház vázlatos alaprajza és betonozás ütemei
[*Balázs–Kiss–Nehme–Zsigovics* (2001)]



23.7. ábra. A szerkezet jellegzetes függőleges metszetei [*Almási* (2004)]

A beton kötéskésleltetéséhez Pozzolith 20 R adalékszert olyan mennyiségben kellett adagolni, hogy a beton – a hőmérséklet függvényében – a szükséges mértékben eltartható legyen.

Amennyiben a betonkeverék konzisztenciája az előírttól eltér, akkor két eset lehetséges:

a) A konzisztencia földnedves lesz. A helyszínen adagolt Pozzolith 90 jelű, nagy hatásfokú képlékenyítő adalékszerrel kell a konzisztenciát KK jelűvé tenni.

b) Ha a konzisztencia K jelű, úgy az eltarthatóság veszélyeztetése nélkül a mixerkocsit félre kell állítani és lassú forgatással a betonkeveréket keverni, majd a konzisztenciamérést ismételten el kell végezni. Amennyiben ekkor megfelelő eredményt kapunk, úgy a betonkeverék még felhasználható, amennyiben az eredmény ekkor sem felel meg, úgy a betonkeverék nem használható fel. Az állás és várakozás során a beton nedvességtartalmát denaturált szeszes kiégetéssel meg kell állapítani, és a tényleges testsűrűség segítségével kiszámítani a víztartalmat. Az így mért eltérésre a tervezettől 15 kg/m^3-nél nagyobb nem megengedett.

23.4.2.4. Az eltarthatóság vizsgálatára javasolt módszerek

A terülést különböző időpontokban kell mérni. Ha a beton a vizsgálat során nem a szokásos módon terül, hanem szétesik, akkor a betonkeveréstől a szétesö vizsgálat előtti vizsgálatig eltelt idő az eltarthatóság.

Vödrös módszerrel 8 db vödröt megtöltünk háromnegyed részig friss betonnal és azokat bevibráljuk, majd 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 órás korban újra bemerítjük a tűvibrátort a sorban következő vödörben lévő betonba addig, amíg a tűvibrátor helye már nem zárul. Az ezt megelőző vibrátor bemerítésig eltelt időtartam az eltarthatóság. Az eltarthatóság a folyamatos betonozás feltétele, amely az adalékszerek fajtájától és mennyiségétől, valamint a betonkeverék hőmérsékletétől függ.

23.4.3. A betonozás

A betont a Lafarge Beton Kft., a Danubiusbeton Betonkészítő Kft. és a Frissbeton Magyar Bau Holding Rt. tagja mixerkocsiban szállította a helyszínre (az összehangolásért a Lafarge Beton Kft. volt a felelős), ahol a betont – a helyszíni ellenőrző vizsgálatok elvégzése után – a betonszivattyúk juttatták a bedolgozás helyére. A betont a Vegyépszer Rt. Építési Divízió tűvibrátorral tömörítette a betontechnológiai utasítás szerint.

A betonösszetételt a betongyárakban próbakeveréssel ellenőriztük. Ekkor vizsgáltuk meg a beton eltarthatóságát is.

A betonozás kétütemű volt. Először a kehelyalap betonozását a lemez alsó síkjáig készítették el, majd második ütemben készítették a 40 cm vastag lemezt.

A betontechnológiai utasítás szerint a lemezt *éjjel kellett betonozni,* míg nappal a kehelyalapokat készítették. Erre két ok miatt volt szükség. Egyrészt a nappali városi

forgalomban nem lehetett biztosan tervezni a mixerkocsik mozgását, valamint a friss beton hőmérséklete éjjel 3–4 °C-kal kisebb volt a nappal szállított betonénál, ami már kedvező a repedésveszély csökkenése szempontjából. Másrészt az egybe betonozandó egységeket úgy kellett megtervezni, hogy minél nagyobbak legyenek, és a már kész lemezrész mellé betonozzák a szomszédos lemezt. A *Betontechnológiai utasítás* szerint, ha a betonozási egységek betonozása között kevés idő telik el, akkor közöttük kettős munkahézagot kell alkalmazni, 30 cm hézagszélességgel. Ezt a munkahézagot szomszédos lemezek lehűlése után volt szabad betonozni. Kettős munkahézag alkalmazására azonban nem került sor.

Az A-D szekciókat elválasztó dilatációs hézagokba Sika Typ M35 jelű, a betonozási egységeket elválasztó munkahézagokba Sika Typ V20L vagy Typ V20 jelű hézagzáró profilszalagokat terveztünk, amelyeket a lemezvastagság felezőjében kellett elhelyezni és úgy megtámasztani, hogy betonozás közben ne mozduljanak el.

A tervek szerint a lemez munkahézagra merőleges acélbetéteit megszakítás nélkül kellett átvezetni.

A betontechnológiai utasításban dilatációs hézagot felül rugalmas hézagzáró kittel javasoltuk lezárni. A hézagzáró kitt vastagsága az átrepedt lemezre fűrészelt hézag szélességének kb. a kétharmada legyen. Rugalmas hézagzáróként a Sikaflex 12SL vagy Sikaflex 15LM jelű anyagokat ajánlottuk. Azonban ezek alkalmazására nem került sor, mert a tervező dilatációs hézag nélküli építéshez ragaszkodott.

Tovább-betonozás előtt a munkahézagok (beleértve a vízszintes munkahézagokat is) betonjára tapadóhíd felhordását írtuk elő a két beton együtt dolgozása céljából (pl. Chem 646 primer, TB Rapid).

Folyamatos telefonkapcsolat segítségével a beton keverését, szállítását úgy kellett megszervezni, hogy a betonozási egység betonozásának a befejezéséig a bedolgozás folyamatos legyen.

A *Betontechnológiai utasításban* brigádonként (betonszivattyúnként) egy db 12 000 percenkénti fordulatszámú és összesen 1 db tartalék vibrátort írtunk elő. A vibrátor hatósugarát próbavibrálással kellett meghatározni. Előírtuk, hogy tilos a betont vibrátorral teríteni.

A legnagyobb betonozási egységhez 3 betongyárból szállították a betont a helyszínre és 4 betonszivattyú továbbította a bedolgozás helyére. A vasalás sűrű volt.

A betonozó brigád munkája a betonozási egység lesimításával ért véget.

A betonpadozatra, amikor a beton lépésálló volt, a Pallas Betéti Társaság TERMIX típusú forgólapátos simítógéppel kopásálló kérget készített. Kopásálló anyagként kb. 3,5 kg/m^2 *grenicentet* (kvarcliszt, cement, porított műgyanta) szórtak a felületre és dolgozták be. A munkát *Ladányi* Sándor irányította.

A munka befejezésével a beton felületét vízzel árasztották el, majd műanyag fóliával takarták be. A gondos utókezelés elengedhetetlen volt.

Ez a befejező munka lényegesen javította a padozat kopásállóságát és repedéssel szembeni ellenállását.

23.4.4. A minőség-ellenőrzés

23.4.4.1. A helyszíni vizsgálatok

A minőségellenőrzést a minőségellenőrzési terv tartalmazta.

Az ellenőrzés a friss beton helyszíni ellenőrzéséből és a megszilárdult beton laboratóriumi ellenőrzéséből állt.

A helyszíni vizsgálatokhoz a Tanszék vizsgáló részlege a Mester utcai kapu mellett helyezkedett el vizsgáló eszközeivel. Megbízó az eső elleni védelmül fóliasátrat készített. A helyszíni vizsgálat a *Beton- és építéstechnológiai utasítás* szerint alábbiakra terjedt ki:

a) Szemrevételezés járművenként.

b) Betonkeverék hőmérsékletének a mérése 50 m^3-enként.

c) Betonkeverék terülésének a mérése 50 m^3-enként.

d) Testsűrűség vizsgálata megkezdett 150 m^3-enként.

e) Víztartalom vizsgálata megkezdett 250 m^3-enként.

f) Betonösszetétel vizsgálata 1000 m^3-enként.

A helyszíni vizsgálat eredményeit a *23.4. táblázatban* foglaltuk össze (példaként csak egy oldalt mutatunk be), amelyben feltüntettük:

- a betonozási alkalmakat érkezési sorrendben;
- a mixerkocsik rendszámát;
- a betongyárat;
- a mixerkocsi érkezését: óra, perc;
- ürítés kezdetét: óra, perc;
- a mixerkocsi távozását: óra, perc;
- a mixerkocsiban szállított betont, m^3;
- a szemrevételezést (Megfelel, azt jelenti, hogy a beton szemrevételezéssel megfelel a KK konzisztenciának. Sűrű, kissé száraz, azt jelenti, hogy nehezen bedolgozhatónak láttuk és rendszerint vizet, illetve képlékenyítő adalékszert engedtünk tenni a mixerkocsiba);
- a betonhőmérsékletet, amelyet EKH 1 Pt 385 típusú digitális ellenállás hőmérővel mértük meg;
- a terülést, cm;
- a friss beton testsűrűségét, 205 mm átmérőjű 242 mm magas, 8 liter űrtartalmú edényben mérve;
- a megjegyzés oszlopban a készített kockák, vízzárósági próbatestek jelét, esetleg a levegő hőmérsékletét, a víztartalom meghatározására utaló szárítást, az összetétel meghatározására szolgáló szétmosást, az átvétel megtagadására utaló visszaküldést és a víztöbblet adagolást tüntettük fel.

A szilárdsági vizsgálathoz szükséges próbatesteket – egy esetben – az építésvezetőség készítette el.

23.4. táblázat. Jegyzőkönyv a Lurdy-ház alaplemeze betonjának a vizsgálatáról 1997.07.28.
[*Balázs–Kiss–Nehme–Zsigovics* (2001)

Sor-szám	Dátum	Mixerkocsi rendszáma	Betongyár	Érkezés, óra, perc	Ürítés kezdete óra, perc	Távozás, óra, perc	Szállított beton m^3	Szemre-vételezés	Beton-hőmérséklet °C	Terülés kg/m3	Testsűr. megjegyzés	Egyéb
1	1997.07.28.	ELM 832	LAF.	13:10	13:30	14:25	6	Megfelel				
2	1997.07.28.	FIE 173	LAF.	13:14	13:35	14:31	6	Megfelel	28			Levegő 32 °C
3	1997.07.28.	FIB 831	LAF.	14:54	15:05	15:42	5	Sűrű	28			10 l vizet betettünk
4	1997.07.28.	ELM 834	LAF.	15:08	15:15	15:45	6	Megfelel	28	40		Kocka
5	1997.07.28.	ELM 833	LAF.	15:38	15:45	16:20	6	Megfelel	28			
6	1997.07.28.	FIE 173	LAF.	15:47	15:55	16:20	6	Kissé száraz	29			
7	1997.07.28.	ELM 832	LAF.	16:23	16:35	17:10	6	Megfelel	28	40,5	2363	Kocka
8	1997.07.28.	FIE 887	LAF.	16:36	16:45	17:23	6	Megfelel	29			5 l vizet betettünk
9	1997.07.28.	ELM 833	LAF.	17:31	17:40	18:06	6	Sűrű	29			5 l vizet betettünk
10	1997.07.28.	FIE 179	LAF.	17:40	17:50	18:20	6	Sűrű	28,5			5 l vizet betettünk
11	1997.07.28.	FIE 887	LAF.	18:44	18:55	19:20	6	Megfelel	28			Kocka
12	1997.07.28.	ELM 833	LAF.	18:54	19:00	19:35	6	Megfelel	28			

23.4.4.2. A helyszíni vizsgálattal kapcsolatos értékelés

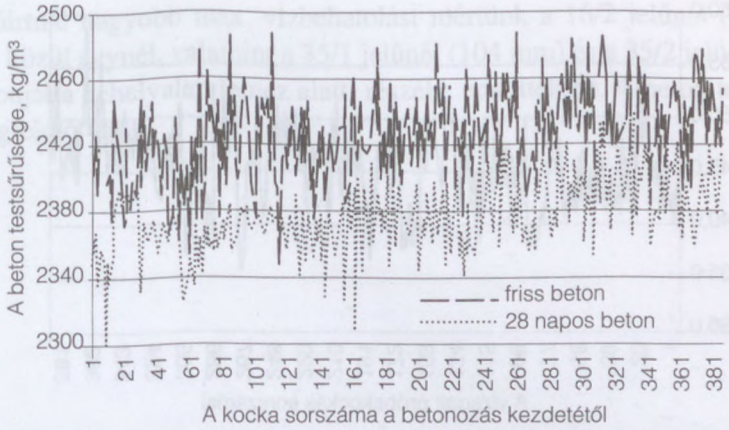
a) A feszített ütemű építést *Papp* Tibor főmérnök, *Szentmihályi Nagy* István építésvezető, valamint *Székács* Norbert Balázs mh. vezető jól szervezték meg, kevés kivételtől eltekintve a tervezett időpontokban betonoztak.

b) Fegyelmezettek voltak a betongyárak is. A betont a szükséges időpontban hozták. Csak egy betonszivattyú nem működött két órán át. Szerencsés volt megbízónk ama döntése, hogy három betongyárral szerződött. Így fennakadás nem volt. A lemezbe nem engedtük bedolgozni a nem megfelelő konzisztenciájú betont. Ezért fordult elő, hogy a Lafarge Beton Kft. betonját négyszer, a Frissbeton Kft. betonját kétszer vissza kellett küldeni. Ha a mixerkocsi vezetője kérte, akkor 20 perc elteltével újra megvizsgáltuk a konzisztenciát, de ez nem hozott változást.

c) Szerencsénk volt az időjárással. Kánikulai (30–40 °C léghőmérséklet) nap nem volt. A nappali léghőmérséklet általában 25–30 °C volt. Eső csak kétszer esett, akkor is rövid ideig. Így a betonozás ütemét csak kis mértékben zavarta meg. Szerencsés volt az, hogy az építésvezetőség megértette a lemez éjjeli betonozásának a szükségességét. Az éjjeli betonozást az esti órákban kezdték és a helyszíni jegyzőkönyvek szerint néhány óra alatt is csökkent a friss beton hőmérséklete. Például: 33. alkalom: 18–24 óráig 24 °C-ról 18,0 °C-ra
44. alkalom: 17–24 óráig 26 °C-ról 21,5 °C-ra
Éjjel zavartalanul közlekedhettek a mixerkocsik.

d) A friss beton víztartalmát spirituszos szárítással határoztuk meg.
Az előírt víz-cement tényező 0,45 volt. A 0,45 víz-cement tényezőt, mint felső határt nem erőltethettük, mert helyenként szokatlanul sűrű volt a vasszerelés. A *Betontechnológiai utasításban* felső határként a 0,50 értéket adtuk meg. Az első napokban még vitatkoztunk a betongyártókkal. Ezt a betont a kehelyalapok alá dolgozták be. Mire a lemezalapra került a sor (12. alkalom) megszokták, hogy a 0,5-nél nagyobb víz-cement tényezőjű betont nem vesszük át. Nem is volt utána szabályszegés.

e) A friss beton testsűrűségét kétféleképpen vizsgáltuk. Egyrészt a beton légtartalma mérésére szabványosított 8 literes hengeres edényben, másrészt azokban a kockasablonokban, amelyekben a szabványos próbakockákat is készítettük. Végül utóbbi esetben ugyanazoknak a kockáknak a 28 napos testsűrűségét is meghatároztuk. Mindezeket együttvéve a *23.8. ábrán* foglaltuk össze.
A 28 napos kockák testsűrűsége minden esetben nagyobb volt az előírt 2280 kg/m^3-nél.
A friss beton testsűrűségét azért mértük kétféleképpen, mert kicsit tanácstalanok voltunk, hogy a továbbiakban melyiket írjuk elő. A kocka egyszerűbb volna, mert nem kell külön eszközt használni. Ebben a kérdésben további értékelés után tudunk állást foglalni.



23.8. ábra. A friss beton és a 28 napos beton testsűrűsége
[*Balázs–Kiss–Nehme–Zsigovics* (2001)]

f) A tényleges betonösszetételt a friss beton szétmosásával határoztuk meg. 12 vizsgálatot végeztünk. A vizsgálatból számított cementtartalom 317–364 kg/m^3 közötti volt.

A szemmegoszlási görbék – függetlenül a betongyártól – az „A" határgörbe közelébe estek. Előírva az „A-B" határgörbék felezőjébe eső görbe volt (lásd *23.5. ábra*). Azért szoktuk ezt előírni, mert az ilyen szemmegoszlású adalékanyaggal készített beton jól szivattyúzható. Már a próbakeveréskor észrevettük, hogy az előírt görbe szerinti szemmegoszlást nem tartják be. Nem tiltakoztunk ellene, mert a betongyáraké volt általában a betonszivattyú is. Várható volt, hogy önmaguk ellen nem reklamálnak a nehezebb szivattyúzhatóság miatt.

23.4.4.3. A laboratóriumi vizsgálatok

A *Betontechnológiai utasítás* szerint minden megkezdett 150 m^3-ként 5 különböző mixerkocsiból származó betonból 1–1 próbakockát kellett készítenünk.

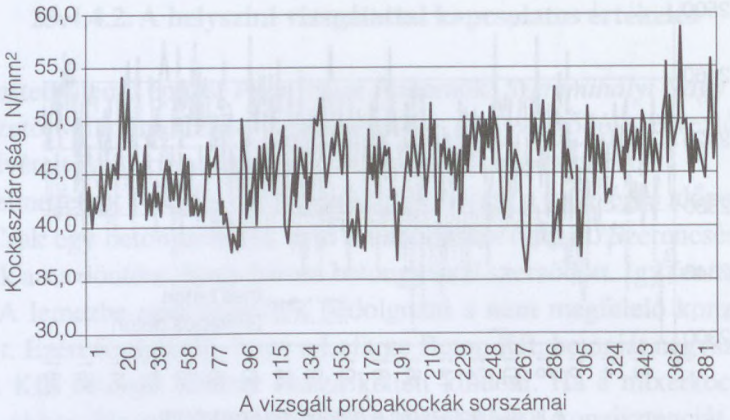
A 150 mm élhosszú kockákat véletlen próbavétel elve alapján vett keverékből készítettük. A betont a sablonban fóliával letakartuk. 16–24 órás korban kizsaluztuk és vízbe tettük. Ebben tároltuk 7 napos korig. 28 napos korban végeztük el a törővizsgálatot.

Hasonlóan készítettük és tároltuk a vízzárósági próbatesteket is.

A vizsgálati eredményeket jegyzőkönyvben rögzítettük. A kockaszilárdságok egyedi értékeit a *23.9. ábrán,* betonozási alkalmankénti minősítési értékeit a *23.10. ábrán* szemléltettük.

Értékelés:

A betonszilárdság a követelményeknek (C25) mindig megfelelt, egy esetben C35, két esetben C30 jelű volt.



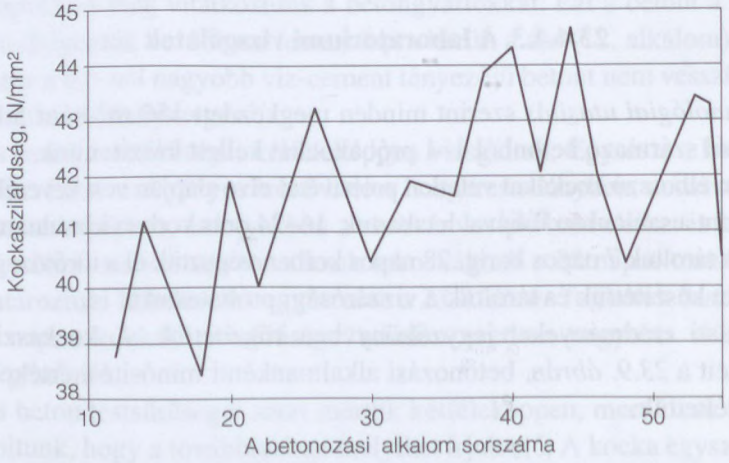
23.9. ábra. A kockaszilárdságok egyedi értékei az A–C szekcióban (egy pont egy mérési eredményt mutat) [*Balázs–Kiss-Nehme–Zsigovics* (2001)]

A *Betontechnológiai utasítás* szerint 500 m^3-enként 2 mixerkocsiból véletlenszerűen vett próbából 1–1 vízzárósági próbatestet kellett készíteni.

Vízzáróság vizsgálatára a szabványos próbatestet ugyanabból a vett próbából készítettük, amelyből a kockákat is (ahogy ezt az *23.4. táblázat* szemlélteti).

A vizsgált betonok a követelményeknek – döntő többségükben – messzemenően megfeleltek. Az alaplemez betonjából készített próbatestek közül, majdnem megfeleltek az alábbiak:

12/5 jelűnél a max. vízbehatolás 40 helyett 42 mm (6 próbatest közül egynél),
14/5 jelűnél a max. vízbehatolás 40 helyett 42 mm (6 próbatest közül egynél),
20/3 jelűnél a max. vízbehatolás 40 helyett 43 mm (4 próbatest közül egynél),
36/4 jelűnél a max. vízbehatolás 40 helyett 42 mm (2 próbatest közül egynél),



23.10. ábra. A kockaszilárdság minősítési értékei betonozási alkalmanként (egy pont egy betonozási alkalom minősítési értékét adja) [*Balázs–Kiss–Nehme–Zsigovics* (2001)]

Az előírtnál nagyobb max. vízbehatolást mértünk a 16/2 jelűnél (63 mm), két próbatest közül egynél, valamint a 35/1 jelűnél (104 mm) és a 35/2 jelűnél (53 mm). Ezek betonját a kehelyalap lemez alatti részébe építették be. A beton terülése ezeknél is megfelelő volt.

24. Könnyűbeton

24.1. Fogalma, osztályozása

[*Kausay* (2002), *Balázs* (1984), *Palotás–Balázs* (1980), *Ujhelyi* (1998, 2005)]

A könnyűbeton olyan építőanyag, amelynek építésfizikai és szerkezeti tulajdonságai igen tág határok között változtathatók. A mérnök és az építész számára így lehetőséget nyújt arra, hogy a könnyűbetonok tulajdonságait az építmény céljának műszakilag legmegfelelőbben, s gazdaságilag legkedvezőbben válassza meg.

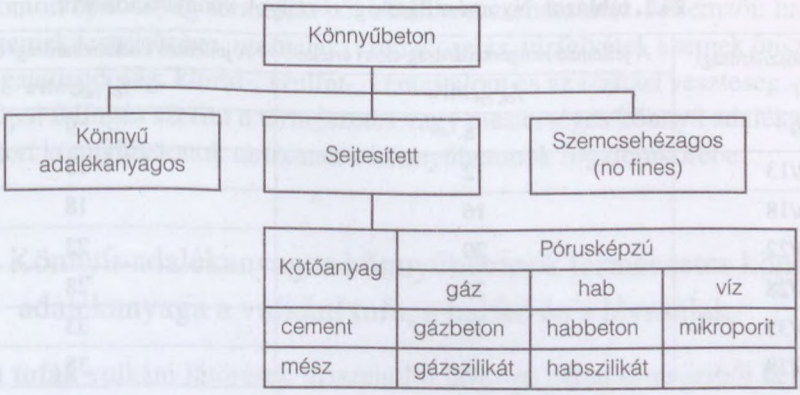
Mivel a magas- és ipari építésben általában a megkövetelt hőszigetelést a közönséges betonnal nem lehet kielégíteni, ezért megfelelő hőszigetelő réteget kell alkalmazni, vagy a szerkezetet magát hőszigetelő és önhordó, illetve teherviselő egyrétegű könnyűbetonból kell készíteni. Az építmények önsúlyának csökkentési tendenciája megteremtette a vasalt, illetve vasbeton-, könnyűbeton-elemek, szerkezetek, sőt az utóbbi időkben feszített beton szerkezeti elemek előállításának lehetőségeit is. A könnyűbetont többféleképpen határozzák meg.

Az MSZ 4798-1:2004 szerint a könnyűbeton 60 °C-on tömegállandóságig kiszárított állapotában legalább 800 kg/m^3 és legfeljebb 2000 kg/m^3 (értékre tervezett) testsűrűségű, szilárd beton. Ezt teljesen vagy részben könnyű adalékanyagok felhasználásával érik el. Ha nincs megadva, akkor a szilárd könnyűbeton testsűrűsége a könnyűbeton 28 napos korára értendő.

A MÉASZ ME-04.19:1995 14.1. fejezete a könnyűbetonok meghatározását ismerteti. Az MSZ 4719 szerint a teherbíró könnyűbeton jele LC, testsűrűsége az MSZ 4715-4 szerint vizsgálva – szilárd, kiszárított állapotban – 600–2000 kg/m^3. A hőszigetelő könnyűbeton jele ILC, hővezetési tényezője legfeljebb 0,3 W/mK. Megjegyzendő, hogy a prEN 206 (1977. április) az LC jelű könnyűbetonokra 800–2100 kg/m^3 testsűrűség határokat adott meg, azóta az EN 206-ban a felső határ 2000 kg/m^3 [*Ujhelyi* (1998)].

Előállításuk módja szerint – a mérnöki gyakorlatban a *24.1. ábrán* feltüntetett csoportokat különböztetjük meg.

a) A **szemcsehézagos könnyűbetonok** csoportjába azokat a betonokat soroljuk, amelyek adalékanyaga 10–20 mm átmérőjű zúzalék és a cementpép az adalékszemcséket csak az érintkezési pontokon ragasztja össze (nagyon telített beton). A szemcsék közötti tér kitöltetlen marad és ezáltal érhető el a betonfal kisebb hővezetési tényezője. Angol neve *no fines* technológia, mert nincs benne finomrész. A falakat csak nyomásra szabad igénybe venni.



Kötőanyag	Pórusképző		
	gáz	hab	víz
cement	gázbeton	habbeton	mikroporit
mész	gázszilikát	habszilikát	

24.1. ábra. A könnyűbetonok felosztása a pórustartalom növelésének a módja szerint [*Balázs* (1994)]

b) A **könnyű adalékanyagos beton** azáltal lesz könnyű, hogy a 24.2. fejezetben ismertetett könnyű adalékanyaggal készítik. Perlittel csak hőszigetelő beton készíthető.

c) **Sejtesített könnyűbetonok**nak azokat a könnyűbetonokat nevezik, amelyeket a 2.4. fejezetben ismertetett gáz-, illetve habképzők vagy fölös víz által bevitt pórusokkal tesznek könnyűvé. Előbbieket *sejtbetonok*nak, gázbetonoknak, pórusbetonoknak, az utóbbit *mikroporit*nak nevezik.

A gázbetonokat vagy pórusbetonokat autoklávolással, kb. 176 °C hőmérsékleten szilárdítják. Kötőanyaga cement, vagy mész. Cement kötőanyagú gáz- és habbetonok szilárdsága két részből tevődik össze, nevezetesen a cement által létrehozott szilárdságból, és a cement szilárdulása során felszabaduló kalcium-hidroxid és a kvarc reakciójából adódó kalcium-hidro-szilikátokból. Gáz- és habszilikát szilárdulása során csak utóbbi szilárdság jön létre. A mész-kovasav reakcióhoz nagy fajlagos felületű, kovasavdús adalékanyagra van szükség. Ez lehet finom kvarcőrlemény, savanyú pernye.

A MÉASZ ME-04.19:1995 Műszaki Előírás – a RILEM munkabizottság álláspontja szerint – a könnyűbetonokat az alábbi 3 csoportba sorolja a betonok testsűrűsége szerint

Testsűrűség, kg/m^3	Megnevezés
< 600	hőszigetelő könnyűbeton
601–1600	hőszigetelő és teherbíró könnyűbeton
1601–2000	teherbíró könnyűbeton

A könnyűbeton szilárdsági osztályait a normálbetonokhoz hasonlóan jelöljük (*24.1. táblázat*).

Az MSZ 4798-1:2004 szabvány a könnyűbetonokat a testsűrűségük alapján is osztályozza és jelöli (*24.2. táblázat*).

24.1. táblázat. Nyomószilárdsági osztályok könnyűbetonokra

Nyomószilárdsági osztály	A jellemző hengerszilárdság előírt értéke	A jellemző kockaszilárdság[a] előírt értéke
	$f_{ck,\,cyl}$ MPa	$f_{ck,\,cube}$ MPa
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 értékeket, ha ezek és a táblázatban megadott referencia hengerszilárdságok közötti összefüggést elegendő pontossággal megállapították és dokumentálták.

24.2. táblázat. Könnyűbetonok osztályozása a testsűrűség szerint (MSZ 4798:2004)

Testsűrűségi osztály	1,0 ρ_{LC} 1,0	1,2 ρ_{LC} 1,2	1,4 ρ_{LC} 1,4	1,6 ρ_{LC} 1,6	1,8 ρ_{LC} 1,8	2,0 ρ_{LC} 2,0
A testsűrűség tartománya, kg/m³	≥ 800 és ≤ 1000	> 1000 és ≤ 1200	> 1200 és ≤ 1400	> 1400 és ≤ 1600	> 1600 és ≤ 1800	> 1800 és ≤ 2000

Megjegyzés: A könnyűbeton testsűrűségét tervezett értékkel is elő szabad írni.

Az MSZ 4798 szabvány csak a könnyű adalékos könnyűbetonokat tekinti könnyűbetonnak.

További tárgyalás során a *24.1. ábra* szerinti osztályozást tekintjük alapnak.

24.2. Könnyűbeton adalékanyagai

[*Kausay* (2002), *Balázs* (1984), *Palotás–Balázs* (1980), *Ujhelyi* (1998)]

Az MSZ EN 13055-1:2003 európai szabvány szerint a könnyű-adalékanyag ásványi eredetű, halmazsűrűsége kiszárított és laza állapotban 30–1200 kg/m³, anyagát tekintve természetes kőanyaghalmaz, vagy természetes nyersanyagból, ipari mellékter-

mékből, bontott építőanyag törmelékéből előállított szemhalmaz. Jellemzői: halmazsűrűség, szemek testsűrűsége, szemalak, szemeloszlás, vízfelvétel, szemek önszilárdsága, térfogatállandóság, klorid-, szulfát-, kéntartalom és az izzítási veszteség.

Az európai felfogás szerint a természetes vagy mesterséges könnyű adalékanyaggal előállított könnyűbetonok tartoznak a könnyűbetonok fogalomkörébe.

24.2.1. Könnyű-adalékanyagos könnyűbetonok természetes könnyű adalékanyaga a vulkáni tufa, a habkő és a lávasalak

A **vulkáni tufák** vulkáni kitörések visszahulló láva- és hamu tömegeiből keletkeztek. Pórustartalmuk 10–60 v% között ingadozik.

Nevükben van a kiömlési kőzet megnevezése, pl. riolittufa (Bodrogkeresztúr), dacittufa (Tar), andezittufa (Szokolya), bazalttufa (Egyházaskesző). Zúzott beton adalékanyagként csak a bodrogkeresztúri kőbányában termelik. Egyébként inkább falazókőnek vagy talajjavításra használják. Finomszemű vagy finomra őrölt változata – ha hidraulikus tulajdonságú kovasavat tartalmaz – a trasz, amely a portlandcementklinker mellett a traszportlandcementek fő alkotórésze [*Vendl* (1953)]. (Pl. CEM II/LA-P 42,5).

A **habkő** a riolit és a kvarcporfír 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 lehűlés lassúbb, akkor kristályos szerkezetű, salakszerű. Hazánkban a Balaton északi partján lévő hegyláncolatban található.

24.2.2. Könnyű-adalékanyagos könnyűbetonok mesterséges könnyű adalékanyagai: a téglazúzalék, a kazánsalak, a habosított kohósalak, a pernyekavics, a keramzit és a habüveg

A **téglazúzalék** a téglagyártás selejtes termékeiből, szanált téglaépületek tégláiból zúzással előállított adalékanyag. A téglazúzalékot könnyűadalékként elsősorban a II. világháború utáni időkben használták, jelentősége jelenleg nem nagy, főként az újabb városépítés és fejlesztés szanálásai során kikerülő rom- vagy bontott anyag hasznosítására célszerű alkalmazni [*Tevan* (1969)]. Legfeljebb LC 16/18 nyomószilárdsági osztályú könnyűbeton (MSZ 4798-1:2004) készítésére alkalmas zúzott téglát lehet ebből előállítani. Törekedni kell arra, hogy a zúzott tégla habarcsszennyeződésektől mentes legyen.

A **kazánsalak** (szénsalak) a kazánokban elégetett szenek visszamaradt hamuja, illetve 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/m^3, 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 $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ cementbacilus keletkezeik, amely duzzad és kedvezőtlen esetben a salakbeton teljes szétesését eredményezheti. A kéntartalmat utánégetéssel, tartós tárolással csökkenteni lehet.

A **kohóhabsalakot** (nyersvasgyártás melléktermeke) a kohósalak babosítása 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 szennyeződéseket. Halmazsűrűsége 700–1100 kg/m^3, szétmorzsolódási tényezője legfeljebb 1,3. A kohósalak azáltal lesz könnyű, hogy szemcseporozitása legalább 50%.

A **granulált kohósalakot** ugyancsak a nagyolvasztó salakjából állítják elő. A vízárammal hűtött, lejtős csatornába juttatott olvadt salakot 4–5 att nyomású vízzel verőlapátkerékre sodorják, ahol, miközben üvegesen megdermed, 0–10 mm-es szemekre aprózódik. A granulált kohósalak halmazsűrűsége 1000–1300 kg/m^3. Könnyű adalékanyag. Ennél jelentősebb, hogy őrleménye gyengén hidraulikus tulajdonságú, amely ezért a portlandcementklinker mellett a kohósalak-portlandcementek fő alkotórésze. A kohósalak-portlandcement granulált kohósalak tartalma legfeljebb 35 tömeg%, pl. CEM II/B-S 32.5, ha ennél több, akkor kohósalakcementről beszélünk (például CEM III/A).

A **pernye-(porszénhamu-)kavics** a hőerőműveknél keletkező porszénhamu granulálása és zsugorítása által előállított könnyű adalékanyag. A granulált anyagot általában – erős légátszívás mellett a benne lévő saját széntartalmával (~3–5%) mintegy 1200 °C körüli hőmérsékleten folytonos üzemű aknakemencében vagy szívó-zsugorító eljárással, agglomeráló szalagon égetik ki. A kiégett termék gömb alakú, nagy szilárdságú, teherhordó betonhoz is kiválóan alkalmas adalékanyag. Nálunk jelenleg nem gyártják. Külföldön (Anglia) gyártják [*Ujhelyi* (1973)]. Csak jól kiégett, egyenletes minőségű pernyekavics használható. Halmazsűrűsége 600–650 kg/m^3, szétmorzsolódási tényezője legfeljebb 0,6.

A széntartalmú hulladékanyagok (kazánsalak, pernye, bányameddő stb.) zsugorodásig való kiégetésével szilárd porózus anyag, az **agloporit** állítható elő, homogenizálva, esetleg kevés fűtőanyag hozzáadásával, általában mozgórostélyos berendezésben. A mozgórostélyon ~15–30 cm vastagságban elterített homogenizált keveréket izzásba hozzák, levegőt szívnak át rajta, s az égetés után a hűtőzónán áthaladt anyag a törő- és osztályozó berendezésbe kerül. Hazánkban nem gyártják.

Duzzasztott agyagkavics (nevezik keramzitnak is). A duzzasztott agyagkavicsot duzzadóképes, finom eloszlásban szerves anyagot tartalmazó, leginkább jura-kori anyagok felhasználásával gyártják. Az agyagot finomra őrlik, granulálják, majd forgódobos kemencében 1200 °C feletti hőmérsékleten kiégetik. Az égetés során az agyag szerves anyagtartalma elég, a szemek megduzzadnak, felületüket megolvadt és szinterezett burok képezi. A gyártási folyamat végén a terméket osztályozzák, és általában 0/4, 4/8, 8/16 mm szemnagyságban forgalmazzák. A duzzasztott agyagkavicsból könnyűbeton falazóelemek, födémelemek, falazóhabarcsok, feltöltések stb. készíthetők. Duzzasztott agyagkavicsot Magyarországon nem gyártanak, de import anyag (például Liapor) felhasználásával könnyűbeton termékek előállítása folyik. Halmazsűrűsége 300–950 kg/m^3. Sem a duzzasztott pernyekavicsban, sem a duzzasztott agyagkavicsban nincs 1 mm-nél kisebb szemcse. Azt vagy zúzással kell előállítani, vagy természetes homokkal kell pótolni.

Duzzasztott üvegkavics (nevezik habkavicsnak, habüvegnek, habosított, illetve duzzasztott üveggranulátumnak is). Új termék, amelynek hazánkban kísérleti gyártása folyik. A hulladéküveget megőrlik, granulálják, felületképző anyaggal vonják be, majd 800–1000 °C hőmérsékleten forgócsöves kemencében kiégetik. Szemnagysága általában 1–25 mm. Az eddigi kutatási eredmények szerint alkálireakcióra nem érzékeny, káros összetevőket nem tartalmaz [*Nemes–Gyömbér* (2001)].

24.2.3. Hőszigetelő könnyűbetonok adalékanyagai: duzzasztott perlit, fagyapotlemez, polisztirolgyöngy

A természetben található perlit vulkanikus eredetű, 3–5 m% víztartalmú üveg. Ha a perlitet 900–1200 °C-ra hevítik, akkor víztartalma gőzzé válik, amely a piroplasztikus állapotba kerülő ásványt 15–20-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	Középfinom perlit	30–70	0/1,0
P1	Középszemcsés perlit	80–120	0,5/2,0
Pd	Durva perlit	80–150	1,0/3,0
Pid	Igen durva perlit	100–200	1,0/5,0

Ezek közül betonkészítésre csak az utóbbi három használható fel. A perlit nem tartalmazhat betonszilárdulást károsan befolyásoló szennyeződéseket. A perlitnek kicsi a szemcseszilárdsága és halmazsűrűsége, ezért csak hőszigetelő betonok és hőszigetelő vakolatok készítésére használható.

A nyers perlitőrleményt az országban több helyen is duzzasztják, a duzzasztási hőmérséklet általában 950–1100 °C. A duzzasztott szemek legnagyobb szemnagysága 5 mm, általában 0/0,5, 0/1, 0/2, 1/5 mm szemnagyságra osztályozzák. Felhasználják hőszigetelő perlitbetonok (ha kötőanyaga cement), perlithabarcsok (ha kötőanyaga cement), perlithabarcsok (ha kötőanyaga mészpép) célra (az építőiparban).

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

Fagyapot, faforgács. A fagyapot 200–500 mm hosszú, 0,5–5 mm széles, 0,03–0,5 mm vastag, a faforgács 30–400 mm hosszú, 20–30 mm széles, max. 15 mm vastag, vegyszeres kezeléssel tartósított rostos faanyag, amelyből cementkötéssel kis testsűrűségű, hőszigetelő tulajdonságú, ún. fabetont lehet előállítani. A cementkötésű fagyapotlap testsűrűsége 380–480 kg/m^3, a cementkötésű faforgácslapé 500–600 kg/m^3. A fabeton lemezekből hő-, és hangszigetelő réteget, zsaluzatot, térhatároló lapot szoktak készíteni. A fabeton termékeket Magyarországon is gyártják. a fagyapot építőelemeket fémsókkal, rendszerint $CaCl_2$-dal itatott fagyapotból és szervetlen kötőanyagból (cement, gipsz, magnézia) készítik. A keveréket táblákba sajtolják. A II. világháború előtt a cementkötésű fagyapotlemezt Magor-lemeznek, a magnéziakötésűt Heraklith-lemeznek nevezték.

A polisztirolbetonnal legkorábban 1960-ban találkoztunk [*Köhling* (1960)]. Adalékanyaga **polisztirolgyöngy.** A polisztirolgyöngy előállításának a menete a következő [*Baum* (1973), *Hoefer* (1973)]: az ásványolajból benzolon és etilénen át közbenső termékként kapott monosztirolt valamilyen duzzasztószerrel és vízzel keverik. Az ezt követő gyöngypolimerizálás során keletkeznek a gömbölyded, üvegszerű, kb. 1000 kg/m^3 testsűrűségű, 0,1–0,3 mm átmérőjű habosítható polisztirol nyersanyagszemcsék, melyeket a használati célnak megfelelően rostálással frakciókra lehet bontani.

Ha ezt az anyagot hevítjük, a benne lévő duzzasztószer hatására 90 °C hőmérsékleten a részecskék megduzzadnak az eredeti térfogatunk mintegy 50-szeresére, és keletkezik a betonadalékanyagként használt 1–5 mm átmérőjű polisztirolgyöngy. A hevítés történhet hősugárzás, forró víz, vagy vízgőz és forró gázok segítségével. Leggyakoribb a forró víz és a vízgőz.

A habosítás lehet szakaszos és folyamatos üzemű. A habosítás tisztán fizikai úton az elgőzösített kelesztőanyag nyomása és a polisztirol hő hatására bekövetkező egyidejű meglágyulása következtében megy végbe. Ezekből a polisztirolgyöngyökből a második lépcsőben állítják elő a polisztirolhab szigetelőlemezeket, amelyeket Hungarocell és Nikecell néven nagy mennyiségben használtunk házgyári panelok hőszigetelő rétegeként.

A polisztirolgyöngyök sejtes szerkezetű, zártcellás, hőre lágyuló műanyagok, 1 cm^3 jól habosított gyöngyben kb. 1 millió poliéder alakú cella van. Falvastagságuk kb. 0,001 mm. A polisztirolgyöngyök felülete sima, vizet víz alatti tárolás esetén alig vesznek fel, jó hőszigetelők. Szemcseszilárdságuk elhanyagolható. Rendszerint

közel egyszemcsések. A folytonos szemszerkezetnek a beton tulajdonságai szempontjából nincs jelentősége. A beton szilárdságát a polisztirolgyöngyök között habarcsváz adja.

24.3. Rövid történeti áttekintés

24.3.1. A könnyűbeton története általában

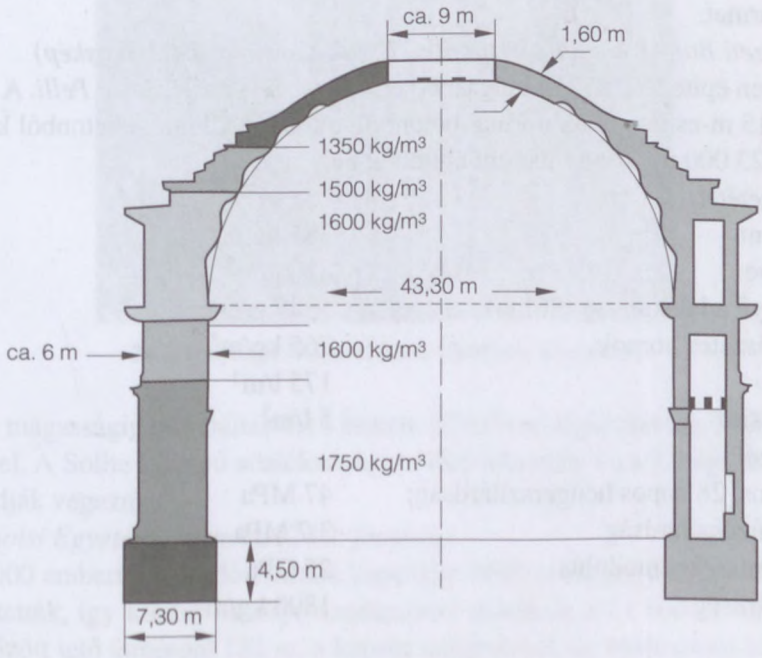
[*Nemes–Józsa* (2004), *Nemes* (2006)]

A könnyűbetont már Krisztus előtt az I. században is alkalmazták. A 43,3 m átmérőjű Pantheont – fölfelé haladva – négy különböző testsűrűségű betonból építették. Az alapozáshoz 1750 kg/m^3 travertinőrleményt, majd traventin- és tufaőrleményt használtak, végül fölfelé haladva tufaőrleményt és téglatörmeléket (1500–1600 kg/m^3), végül legfelül 1350 kg/m^3 testsűrűségű könnyű tufaőrleményt használtak. (*24.1. fénykép*)

A Pantheon példája azt mutatta, hogy a rómaiak mind statikai, mind tartóssági szempontból kitűnőt alkottak [*Kollár* (1997)].

A Római Birodalom bukásával a beton és vele a könnyűbeton is feledésbe merült. Ezután a XX. században alkalmaztak először könnyűbetont az Egyesült Államokban.

Az 1960-as években az Egyesült Államokban toronyházakat és hidakat építettek könnyűbetonból.



24.1. fénykép. A Pantheon függőleges metszete

Napjainkban az Egyesül Államok, Japán, Németország, a skandináv országok járnak élen a könnyűbeton alkalmazásában. Napjainkban gyakorlatilag minden építőmérnöki területen elterjedt. Feszített szerkezetekben alkalmazták hiperbolikus héjként [*Romić Lazić* (1985)].

A természetes porózus adalékanyagok mellett a XX. század elejétől megjelentek a mesterséges könnyűadalékanyagokat előállító üzemek (1917 Kansas City, 1931 Európa, 1951 Magyarország). [*Rudnai* (1963)]

Az 1948-as évektől kezdve Európában is megkezdődött a könnyűbeton ipari előállítása, elsőként Dániában.

Az 1960-as évektől új építészeti stílust teremtett a könnyűbeton Amerikában. Ennek első példája az 1962-ben épített, 180 m magas chicagói Marina City Towers.

Az 1950-es évektől hazánkban könnyűbetonkutatások folytak az Építéstudományi Intézetben és a BME Építőanyagok Tanszéken.

Magyarországon a salakbetont már 1965-ben is említették. *Sobó* (1898) könyvében már ajánlotta a nagyolvasztósalakot könnyűbeton adalékanyagként a porfír és a téglatörmeléken kívül. Nem terjedt el a salakok nagy kéntartalma okozta nagy duzzadása miatt [*Mihailich–Haviár* (1966)].

A CEB/FIB Könnyűbeton munkabizottsága 1995-ben alakult, ez 1998-ban átalakult a *fib* 8.1 munkabizottságává (*fib* bulletin 8 Lightweight Aggregate Concrete Part 3. Case studies fib 2000. Sprint-Druch Stuttgart.)

Ez gyűjtötte össze a különböző országok könnyűbetonra vonatkozó nemzeti szabványait, és a 2000-ig megépült jelentős megvalósult épületeket, ezekből mutatunk be hármat.

1. Nemzeti Bank Charlotte központja, Észak Karolina (24.2. fénykép)

1992-ben építették, 252 m magas, 60 emeletes. Tervezője Cesar *Pelli*. A központi mag és a 15 m-es gerendák normál betonból, a födémek könnyűbetonból készültek. Összesen 23 000 m^3 könnyűbetont építettek be.

Az összetétel:

– cement	385 kg/m^3
– pernye	83 kg/m^3
– könnyű adalékanyag (Solite)	534 kg/m^3
– természetes homok	765 kg/m^3
– víz	175 l/m^3
– folyósító	5 l/m^3

Jellemzői:

– átlagos, 28 napos hengerszilárdság:	47 MPa
– átl. húzószilárdság	3,7 MPa
– rugalmassági modulus	25 GPa
– testsűrűség	1890 kg/m^3

24.2. fénykép: Nemzeti Bank Charlotte központja

252 m magasságig pumpálták fel a betont, 65 m^3/óra kapacitással, 12,5 cm átmérőjű csővel. A Solite könnyű adalékanyagot előre telítették vízzel, hogy a szivattyúzást el tudják végezni.

2. Illinoisi Egyetem csarnoka (24.3. fénykép)

A 18 000 embert befogadó csarnok kupoláját 9600 m^3 könnyűbeton felhasználásával építették, így kisebb önsúlyú szerkezettel fedték le a 11 600 m^2-es felületet.

A redőzött tető átmérője 122 m, a kupola szegmensei, az előfeszített körgyűrű, a központi gyűrű és a nézőtéri szerkezet könnyűbetonból készültek.

24.3. fénykép. Az illinoisi Egyetem csarnokának távlati képe

A könnyűbeton fő jellemzői:

– cement	515 kg/m^3
– természetes homok	316 kg/m^3
– könnyű adalékanyag (Materialite)	635 g/m^3
– hatékony víz-cement tényező	0,45
– légtartalom	3–5 %
– testsűrűség 28 napos korban:	1680 kg/m^3
– nyomószilárdság (hengeren) 28 napos	28 MPa
Tervezők:	Harisson és Abramovitz
Szerkezettervező:	Ammanm és Whitney

3. Marina City tornyok, Chicago (24.4. fénykép)

A 180 m magas, 64 emeletes *kukoricaházakat* 1962-ben építették, tervezője a Bertrond Goldberg Társaság. Az épület külső átmérője 39 m. 19 000 m^3 könnyűbetont használtak fel, ennek fő jellemzői:

Összetétel:

– cement	310 kg/m^3
– természetes homok	415 kg/m^3
– könnyű adalékanyag (Materialite)	830 g/m^3
– hatékony víz-cement tényező	0,64
– légtartalom	5–8 %
Jellemzők 28 napos korban:	
– testsűrűség kiszárítva:	1680 kg/m^3
– nyomószilárdság (hengeren)	25 MPa
– rugalmassági modulus	16 GPa

24.4. fénykép. A Marina City tornyok

24.4. A könnyűbeton hazai felhasználása

[*Balázs* (1996)]

Továbbiakban példákat mutatok be arra, hogy a könnyűbetont milyen építési célra használták fel hazánkban.

24.4.1. A No-fines beton

24.4.1.1. A No-fines rendszer

A No-fines építési rendszer az angol Wimpey cég szabadalma. A rendszert az ÉVM és az OKISZ vásárolta meg a szövetkezeti lakásépítő ipar részére 1979-ben.

A *No-fines építési rendszer* magában foglalja az egyszemcsés öntöttbeton összetételét, készítési módját, a jól önthető, de kis oldalnyomást átadó betonkeveréknek megfelelő könnyű, nagytáblás zsaluzati rendszert, a zsaluzatra szerelhető nyílászárók elhelyezési technológiáját, az egyes épületszerkezetek csatlakozási módjait és a falhoz tartozó vakolatot.

A rendszer előnye, hogy az indítás idején meglévő panelos, valamint alagútzsalus építési rendszerhez viszonyítva több tervezési szabadságot engedett meg.

A *No-fines* építési rendszer teherviselő főfalként 5 szintig volt alkalmazható. Ennél magasabb épületet vasbeton oszlopokkal kellett megerősíteni. A megerősítés során először a falakat építették meg szintenként, kirekesztve a vasbeton pillér helyét, majd az oszlop helyét biztosító szerkezetek fokozatos eltávolításával egyidejűen kiöntötték a vasbeton oszlopokat. Az oszlopok betonjának a megszilárdulásáig részt vett a teherviselésben a kitöltőfal betonja is. Így meg lehetett takarítani az oszlopok állványozásának és zsaluzásának költségeit. A zsalugarnitúra már 100 lakás építése esetén amortizálódott.

Az építkezés kis munkaigényű, mert a zsaluzatba öntött betont nem kell tömöríteni, és mert a belső felületképzést általában felszegezett gipszkartonlapokkal oldották meg, vagy gépi vakolást alkalmaztak.

A rendszer hazai tulajdonosa a *No-fines Technológiai Társulás* volt.

A rendszer szabályozó irata az ÉVM által kiadott *ME-04 101-83 No-fines rendszerű öntöttbeton alkalmazása* c. Műszaki Előírás volt.

24.4.1.2. No-fines beton

A beton egyik alapanyaga a *cement,* amely feleljen meg az MSZ 4702 szabvány szerinti 350, illetve 450 szilárdsági jelű cementeknek.

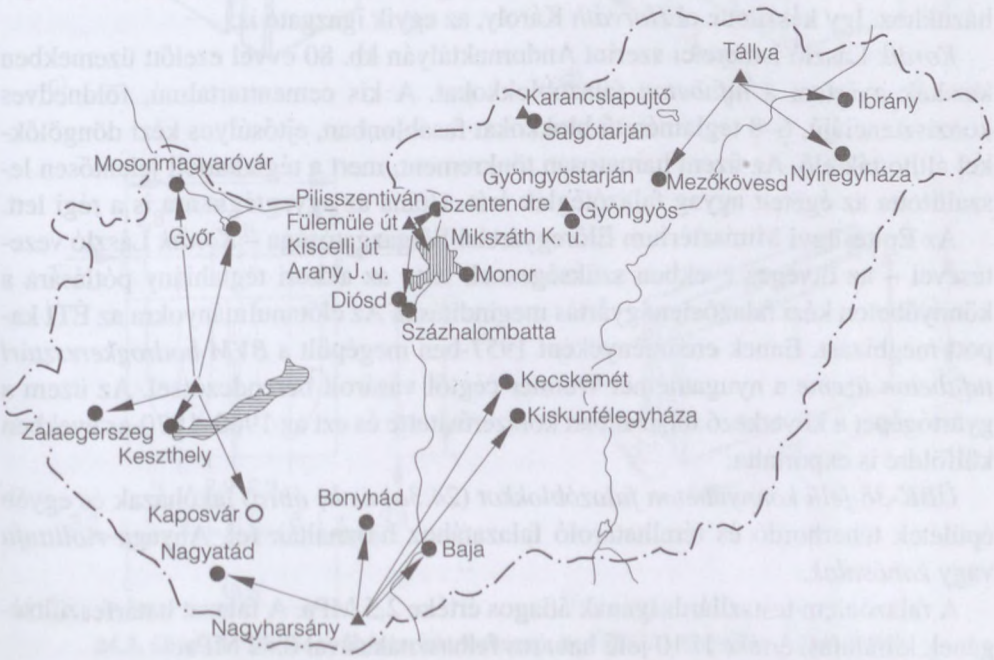
Az *adalékanyag* bármely természetes (zúzott vagy természetes aprózódású), mosott és osztályozott 10–20 mm szemcseméretű kőzet lehet, ha legalább 2,6 t/m^3 testsűrűségű, 24 órás vízfelvétele fokozatos vízbemerítésre 1,2 m%-nál kisebb. A zömök szemcséket kell előnyben részesíteni. Hazánkban bevált a zúzott tömött mészkő, zúzott dolomit és zúzott bazalt. A hazai építőszövetkezetek építőanyag ellátottságát a *24.2. ábra* szemlélteti.

A *betonösszetétel* kidolgozásában és ellenőrzésében *Weiss* Györgynek (1979, 1980), a társulás laboratóriuma vezetőjének meghatározó szerepe volt.

A betonhoz annyi cement kell, hogy az adalékanyag-szemcsék felületét bevonja, és a szemcsék között szilárd kötést hozzon létre. A helyes adalékanyag-cement tömegarány 7:1–8:1, a víz-cement tényező 0,35–0,40, a cementtartalom általában 180–220 kg/m^3 volt. Jó összetétel esetén a megszilárdult beton kőzetszemtartalma kb. 55 V%. Ha a víz kevés, akkor nem vonja be a pép az adalékanyag-szemcséket, ha sok, akkor a híg pép nem tapad jól a szemcsékre és lefolyik a fal aljába. A beton önthetőségét próbaöntéssel bírálták el. *Kerekes* B. (1978) szerint a jól megkevert beton olyan, mint az eredeti adalékanyaghalmaz, azonban a szemcsefelületen csillogó cementpépréteg látható.

A betont a keverést követő 10 percen belül rétegesen be kell önteni a zsaluzatba, vibrálni nem szabad.

A bedolgozott beton különleges utókezelést nem igényel, de 6 napig óvni kell a kiszáradástól és a +5 °C alá hűléstől.



24.2. ábra. A „no-fines" betonból épített lakótelepek kőzetellátottsága 1992-ig [(*Kerekes* B. (1982)]

A *No-fines beton szilárdságát* 15 cm élhosszú kockán, 28 napos korban kell minősíteni. A légszáraz beton testsűrűsége – a kőzetfajtától függően – általában 1750–1850 kg/m^3, a 28 napos átlagos kockaszilárdsága kb. 8,4 MPa. Követelmény a szilárdság minősítési értéke, amely legalább 2,5 MPa, amelyhez 1,63 MPa határfeszültség tartozott (a minősítési érték 0,65-szöröse). A beton hajlító-, húzó- és nyomószilárdságának a viszonya kb. 0,5.

A légszáraz *No-fines* beton hővezetési tényezője – lezárt pórusrendszer esetén – 0,76–0,87 W/mK volt [*Weiss* Gy. (1979)].

A No-fines Technológiai Társulásba tartozó szövetkezetek szilárdság- és testsűrűség – vizsgálati eredményeit a központi labor (*Weiss* György műszaki gazdasági tanácsadó) évenként értékelte és javaslataival együtt a tagoknak megküldte.

24.4.2. Kézi falazóelemek

24.4.2.1. Könnyű adalékanyagos falazóelemek

Nem találtunk irodalmi utalásokat, hogy ki és mikor gyártotta az első beton kézi falazóelemet. A könnyű adalékanyagok felhasználásának egy helyi példáját láttam az Ózdi Kohászati Üzemekben, 1958-ban. Dolgozóinak sablont és minimális betonismeretet adtak, hogy *kohósalakból* saját maguk készítsék el a falazó elemeket saját házukhoz. Így készítette el *Horváth* Károly, az egyik igazgató is.

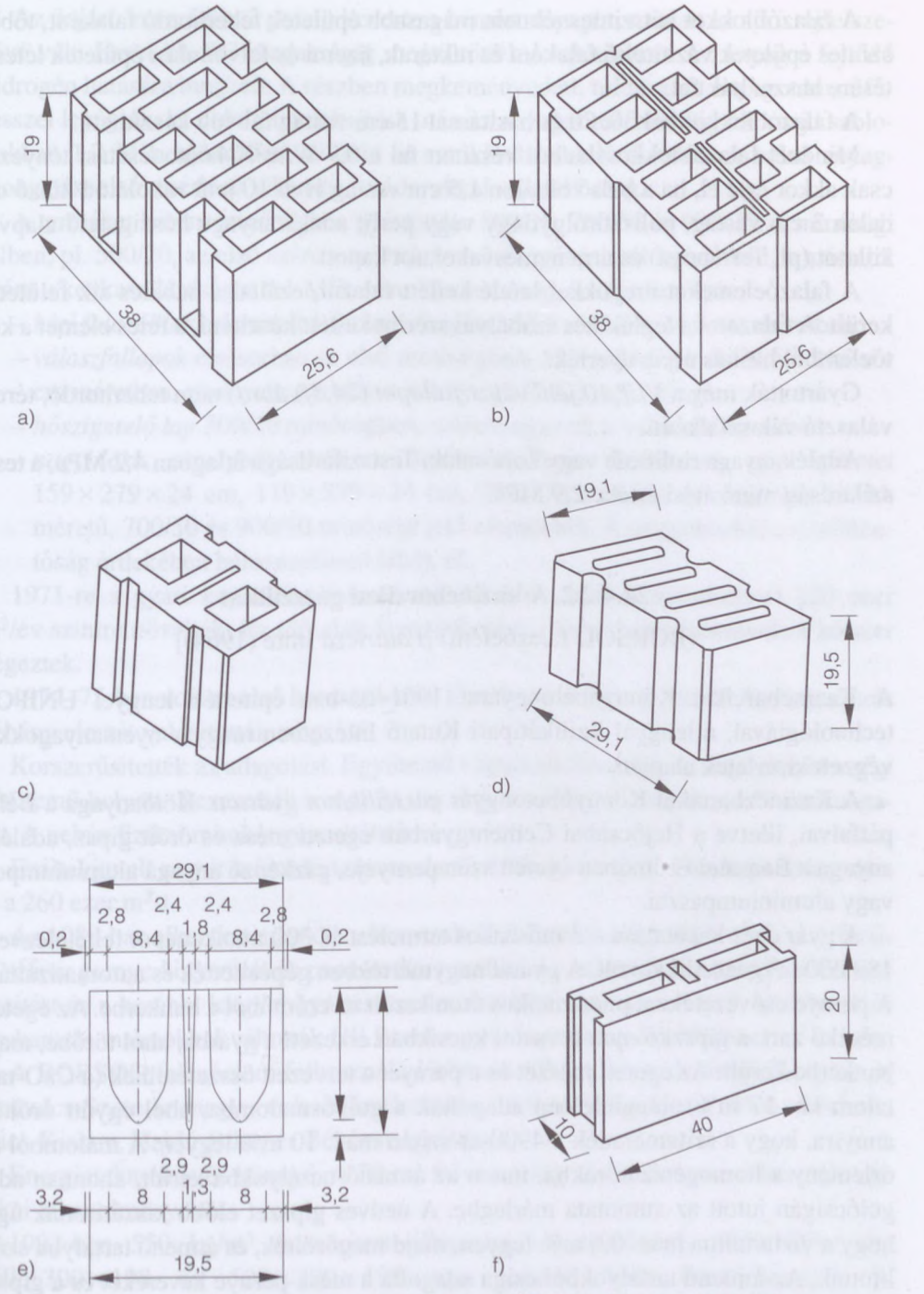
Kordik László ismeretei szerint Andornaktályán kb. 80 évvel ezelőtt üzemekben kezdték gyártani a *tufabeton* falazóblokkokat. A kis cementtartalmú, földnedves konzisztenciájú, 6–8 téglaméretű blokkokat fasablonban, ejtősúlyos kézi döngölőkkel állították elő. Az üzem hamarosan tönkrement, mert a téglakartell jelentősen leszállította az égetett agyag falazótéglák árát. Utána az agyagtégla ára is a régi lett.

Az Építésügyi Minisztérium Előregyártási Főigazgatósága – *Kordik* László vezetésével – az ötvenes években szükségesnek látta az akkori téglahiány pótlására a könnyűbeton kézi falazóelem gyártás megindítását. Az előtanulmányokra az ÉTI kapott megbízást. Ennek eredményeként 1957-ben megépült a *BVM bodrogkeresztúri tufabeton üzeme* a nyugatnémet Weimer cégtől vásárolt berendezéssel. Az üzem a gyártógépet a következő időszakban korszerűsítette és ezt az 1960–1970-es években külföldre is exportálta.

ÜBK-38 jelű könnyűbeton falazóblokkot (*24.3a) és b) ábra*) lakóházak és egyéb épületek teherhordó és térelhatároló falazatához használták fel. Anyaga *riolittufa* vagy *kohósalak*.

A falazóelem testszilárdságának átlagos értéke 2,5 MPa. A falazat határfeszültségének kiindulási értéke H 10 jelű habarcs felhasználásával 0,42 MPa.

*FB–30 és FBM–30 jelű kézi falazóblokk*ot (*24.3c), d), e) ábra*) *riolittufa* adalékanyaggal készítették. Testszilárdsága 5 MPa.



24.3. ábra. BVM könnyűbeton falazóelemei: *a)* ÜBK 38 alapelem, *b)* kötőelem, *c)* FB-30, *d)* FBM-30 jelű falazóelem, *e)* a falazóelem metszete, f) válaszfalelem [BVM gyártmánykatalógus, 1990]

A falazóblokkot kétszintesnél nem magasabb épületek teherhordó falaként, többszintes épületek vázkitöltő falaként és raktárak, üzemi és felvonulási épületek létesítésére használták fel.

A falazóblokkokból 30, 20 és hasítással 15 cm vastag fal volt készíthető.

Mindkét falazóblokkcsaládból készített fal a 0,7 W/m^2K hőátbocsátási tényezőt csak akkor érte el, ha a belső oldalon 1,5 cm vastag Hvb 10 jelű vakolatot, külső oldalán 3 cm vastag, polisztirolgyöngy vagy perlit adalékanyagú hőszigetelő alapvakolatot (pl. Terranova) és arra nemesvakolatot kapott.

A falazóelemeket üregükkel lefelé kellett falazni, ezáltal a habarcs sík felületre került. A falazatot a téglakötés szabályai szerint kellett készíteni, a feles elemet a kötőelemből hasítás útján nyerték.

Gyártották még a *VLT 10 jelű válaszfallapot* (*24.3f) ábra*) nem teherhordó, térelválasztó válaszfalként.

Adalékanyaga riolittufa vagy kohósalak. Testszilárdsága átlagban 4,2 MPa, a testszilárdság minősítési értéke 2,9 MPa.

24.4.2.2. A kazincbarcikai gázszilikát

(BORSOD falazóelem) [*Pataricza* Imre (1964)]

A Kazincbarcikai Könnyűbetongyárat 1961–63-ban építették lengyel UNIPOL technológiával, a lengyel Szilikátipari Kutató Intézetben magyar nyersanyagokkal végzett kísérletek alapján.

A Kazinczbarcikai Könnyűbetongyár *gázszilikátot gyártott.* Kötőanyaga a Bélapátfalvai, illetve a Hejőcsabai Cementgyárban égetett mész és őrölt gipsz, adalékanyaga a Berentei Erőműben égetett szén pernyéje, gázképző anyaga alumíniumpor, vagy alumíniumpaszta.

A gyár éves kapacitása – 3 műszakos termelést és 300 munkanapot feltételezve – 180 000 m^3 gázszilikát volt. A gyárat nagymértékben gépesítették és automatizálták. A pernye csővezetéken, pneumatikus úton került az erőműből a bunkerbe. Az égetett mészkő zárt, a gipszkő nyitott vasúti kocsikban érkezett a gyárba, ahol törőbe, majd bunkerbe került. Az égetett meszet és a pernyét a tervezett összetételnek (a CaO-tartalom kb. 17 m%), megfelelően adagolták a golyósmalomba, ahol együtt őrölték annyira, hogy a szitamaradék a 4900-as szitán max. 10 m% legyen. A malomból az őrlemény a homogenizátorokba, innen az átmenő tartályokba került, ahonnan adagolócsigán jutott az automata mérlegbe. A nedves gipszet előbb kiszárították úgy, hogy a víztartalma max. 0,6 m% legyen, majd megőrölték, és átmenő tartályba szállították. Az átmenő tartályokból csiga adagolta a mész-pernye keveréket és a gipszkövet az automata mérlegbe. A lemért anyagok mozgó keverőbe adagolási sorrendje: emulzióval kevert víz, pernye-mész keverék, gipszkő és végül kevés vízzel összekevert alumíniumpor vagy emulzióval kevert alumíniumpaszta.

Az önjáró keverő kb. 2 percig keverte a bemért anyagot, mialatt az sűrű tejfelszerűvé vált. Ezzel kb. 2/3 magasságig megtöltötték a sablonokat. Az anyag a fejlődő hidrogén hatására megkelt. A részben megkeményedett, túlduzzadt anyagot huzalfűrésszel levágták, az oldalfalak lehajtása után az anyagot méretre vágták, majd sablonokban 1,2 MPa nyomáson 20 órán át autoklávban szilárdították. A belső anyagmozgatást alsóvezérlésű villamos futódarukkal oldották meg.

A terméket három minőségben gyártották: 500/20, 700/50 és 900/75. A minőségi jelben, pl. 500/20, az első szám a termék testsűrűségét jelenti kg/m^3-ben, a második szám a kockaszilárdságot 0,1 MPa-ban. Kezdetben gyártott termékek:

– *kézi falazóblokkok* mindhárom minőségben 52,9 × 25,0 × 24,0 cm méretben;
– *válaszfallapok* elsősorban az első minőségben, 52,9 × 24,0 × v és 79,5 × 24,0 × v cm méretben, ahol v a vastagságot jelenti és 6,2, 8,2 vagy 10 cm;
– *hőszigetelő lap* 500/20 minőségben, mérete egyezik a válaszfallapokéval;
– *nagyblokk,* amelyből elsőként Sajószentpéteren készítettek egy épületet 159 × 279 × 24 cm, 119 × 279 × 24 cm, 79 × 279 × 24 cm és még más kisebb méretű, 700/50 és 900/50 minőségi jelű elemekből. A nagyobbakat a szállíthatóság érdekében hálóvasalással látták el.

1971-re a gyári kapacitást ésszerűsítésekkel és saját fejlesztésekkel 220 ezer m^3/év szintre növelték. Ez idő alatt korszerűsítést, illetve kapacitásnövelést kétszer végeztek.

1974–75-ben volt az első korszerűsítés. Ennek során a csehszlovák Poring eljárás néhány elemét valósították meg.

Korszerűsítették az adagolást. Együtemű vágást alkalmaztak új vágógéppel a régi kétütemű helyett. Bevezették a régi 24 cm magas sablonok helyett az 50 cm magasat. A nehéz fizikai munkát gépesítették.

Ezáltal javult a gyár műszaki színvonala, és 1976-ban a gyár éves kapacitása elérte a 260 ezer m^3-t.

Az 1980-ban elkezdett második rekonstrukció folyamán megvalósították az erőművi száraz pernye kinyerését és pneumatikus szállítását, valamint bővítették az őrlőkapacitást és a korábbi lengyel gyártású malmokat körfolyamatos őrlésű, légkihordású egykamrás malmokkal váltották fel. Ezzel a gyár kapacitása évi 400 ezer m^3-re nőtt.

A BORSOD falazóelem felhasználási körzete főként Borsod-Abaúj-Zemplén és Szabolcs-Szatmár megye volt. Mérsékeltebb a felhasználás Heves, Pest, Szolnok, Bács-Kiskun, Hajdú-Bihar és Békés megyékben.

Energiatakarékos és könnyű. A 30 cm falvastagság kielégítette az akkori hőtechnikai követelményeket.

1992-ben 550 kg/m^3 (kiszárított állapotban) testsűrűségű, 400 × 300 × 198, 450 × 300 × 198 és 500 × 300 × 198 mm méretű kézi falazóelemeket és 500 × 125 × 397 mm méretű válaszfalelemeket gyártottak, amelyet egy- és kétszintes családi házak építéséhez használtak fel. Nagy előnye, hogy faipari szerszámokkal megmunkálható.

A gázszilikát megkövetelt nyomószilárdsága 2,0 MPa, hővezetési tényezője 0,16 W/mK, zsugorodása legfeljebb 0,6 mm/m. A gázbeton páraátbocsátó képessége jó. A gyár 1992 óta az YTONG HUNGARY Kft. tulajdona.

Az 1990-es évek közepén a borsodi iparvidéken elfogyott az addig bőségesen rendelkezésre álló pernye, a könyűbetongyár gépi berendezései pedig annyira elöregedtek, hogy a német tulajdonosok nem látták értelmét a gyártás további folytatásának. Ezért a kazincbarcikai könnyűbetongyárat 1998. december 31-én végleg bezárták.

24.4.2.3. Gázbeton – pórusbeton

Az 1980-as évek elején a hazai piacon falazóanyag-hiány mutatkozott. Az 1973. évi, majd azt követő olajárrobbanás miatt megnőttek az energiaárak, szigorodtak a hőátbocsátási tényezőre vonatkozó előírások, energiatakarékosabb falazóanyagokra volt szükség.

Az energiaracionalizálási program keretében a KŐSZIG Vállalat is pályázatot dolgozott ki egy korszerű, jó hőszigetelési tulajdonságokkal rendelkező falazóanyagot előállító gyár megvalósítására. A vállalat a gyár létrehozásával nemzetgazdasági szinten kettős célt tűzött ki. Egyrészt a hazai falazóanyag gyártáskapacitás növelését. Másrészt a magyarországi hőerőművekben keletkező pernye felhasználásával alapanyagként enyhíteni akarta a pernye okozta környezetszennyezést.

A magyarországi hőerőművekben képződő pernyék alapos bevizsgálása után a gázbetongyártásra a Gagarin Hőerőmű pernyéjét ítélték a legalkalmasabbnak.

A tervezést az ÉTI, az építőipari kivitelezést az Észak-magyarországi ÁÉV, a technológiai szerelést az Aprítógépgyár, az import gépbeszerzési és a technológiai szolgáltatás feladatait, valamint a beruházás bonyolítási teendőit az Építőipari Beruházási V. végezte a KŐSZIG Vállalat megbízásából. A Mátra Gázbetongyár gyártástechnológiája a nyugatnémet HEBEL International GmbH cég gyártási eljárásának átvételére épült. A gyár technológiai berendezéseinek 45%-át közvetlenül a HEBEL cég szállította, 55%-át pedig német tervdokumentációk alapján magyarországi üzemekben gyártották le.

A gyárat 1982 szeptemberében kezdték el építeni, 1985 szeptemberében kezdődött meg a gyártás, és 1986. április 5-én adták át hivatalosan. Az évi kapacitás 563 ezer m^3 volt.

A gázbetongyártáshoz alapvetően poranyagokat használtak fel: 70 m% pernyét, 20 m% cementet és 10 m% őrölt égetett meszet. Ezek közül csak a cement tekinthető közvetlenül felhasználható nyersanyagnak, a cementfinomságú pernyét szélosztályozással, az őrölt meszet kétfokozatú őrléssel kellett a gyárban előállítani. A gyártás viszonylag nagy mennyiségű vizet igényelt, ennek ellenére ipari szennyvíz nem hagyta el a gyárat, a technológia – az összes hulladékvizet visszaforgatva – hasznosította.

A gázbetongyártás döntő eleme az alapanyagok nagy pontosságú, gyors bemérése. Ezt a feladatot számítógépes vezérlésű rendszer végezte. Ez tárolta a gyártási receptúrákat, és megadott megrendelés alapján elvégezte 4 percenként az adagonkénti bemérést.

A 4 óra alatt megduzzadt és előkeményedett tömböket szorítópofás daru emelte ki a sablonból és helyezte át a vágógépre. Vágáshoz Ø1 mm-es acélhuzalt használtak. A gyártás méretpontossága ± 3 mm-en belül volt.

A méretre vágott terméket 12 órán át 12 bar nyomáson, telített gőzben autoklávolták. A gyártás utolsó fázisaként a késztermékből 40 db-os egységrakatokat képeztek.

A termelés 1987-ben elérte az évi 830 ezer m^3-t.

A Mátra gázbeton összetétele hasonlít a kazincbarcikai gázszilikátéhoz, de itt a kötőanyag nem csupán mész, hanem mész és cement volt. A végtermék sima felülete és könnyű megmunkálhatósága miatt hamar megkedvelték.

A gyakorlat bebizonyította, hogy a gázbeton szilárdságánál jóval nagyobb nyomó- és húzószilárdságú ragasztóhabarcsok (CEMENTA, TERRANOVA, SZILETON, MÁTRA) nem alkalmasak dilatálatlan szerkezetek építésére, mert hibátlan kivitelezés esetén is megrepedt a kis húzószilárdságú gázbeton.

Továbbá megrepedhetett a gyors kiszáradás miatt is. A Mátra gázbetonra vonatkozó ismeret bővülését követte a műszaki jellemzők változása is. 1988-tól kezdődően nem szerepel az ismertetőkben a 700 kg/m^3 testsűrűségű termék és a ragasztóhabarcsos falazás. Azóta hőszigetelő habarcs alkalmazását részesítették előnyben.

1990 első félévében 100 millió Ft-os beruházással megvalósításra került a Mátra Gázbetongyárban a homokőrlés technológiája, megteremtve ezzel a pernye alapú helyett a *homok alapú falazóanyaggyártás* feltételeit.

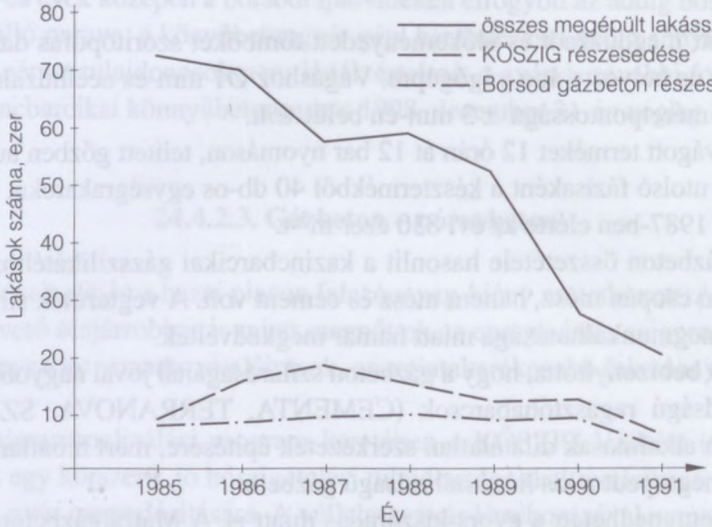
1990-ben a Müncheni Műszaki Egyetem Építőanyagvizsgáló Intézete a DIN szabvány előírásait kielégítőnek minősítette a Mátra Gázbetongyár által gyártott homok alapú falazóanyagot.

A vizsgálati eredmények alapján a HEBEL cég hozzájárult ahhoz, hogy a homok alapanyagú termék „HEBEL FALAZÓELEM" néven kerüljön forgalomba. Az 1990-ben értékesített mennyiség 25%-a már HEBEL FALAZÓELEM volt. 1991-ben ez az arány 50%-ra növekedett.

A kereskedelmi igényekhez igazodva a Mátra Gázbetongyárban a pernye alapú gázbetongyártás 1991 augusztusától megszűnt. Az építőanyagok iránti kereslet tartós csökkenése miatt a Mátra Gázbetongyár kapacitásának 25–30%-át kihasználva üzemelt 1989-től.

1992. januárban a vállalat kérte a felszámolását. 1992. július 1-jétől az új tulajdonos az YTONG HUNGARY Kft., amely 100%-ban német tulajdonú társaság. Az YTONG csoportnak Európa 13 országában 21 gyára van. A vállalat vezérigazgatója a tulajdonosváltás előtt és után *Iffy* László.

A tulajdonosváltozás időpontjáig 40 000 lakáshoz szükséges falazóanyagot gyártottak. A KŐSZIG V. gyárai a falazóanyag termelésben 1985 óta a *24.4. ábra* szerint vettek részt.



24.4 ábra. A gázbeton részesedése a hazánkban megépült lakásokból [YTONG Hungary Kft.]

Az YTONG HUNGARY Kft. 1993-ban útmutatót dolgoztatott ki az YTONG építőelemekhez. Az útmutatót *Józsa* Zsuzsanna, *Juhariné Koronkay* Andrea, *Madaras* Gábor, *Simon* Tamás és *Velősy* András készítette.

A hazánkban is gyártott pórusbetont 1924-ben Axel *Erikson* svéd építész állította elő először azzal a céllal, hogy az épületfát hőtechnikailag közel egyenértékű, de nem éghető és tartós falazóanyaggal helyettesítse. A kikísérletezett termékeket 1929-ben YTONG márkanéven szabadalmaztatták.

Az YTONG építőelemek alapanyaga a megfelelő arányban összekevert finomra őrölt homok, mész, cement, REA gipsz és víz, pórusképző anyaga az alumíniumpaszta. A formába öntött terméket pihentetik, méretre vágják, majd autoklávolással (nagynyomású gőzöléssel) szilárdítják. A cement szerepe elsősorban a formába öntött keverék dermesztése, míg a termék szilárdságát elsősorban a mész-kovasav (kvarcliszt) reakciójából keletkező kalcium-szilikát-hidrátok adják.

A környezet védelme miatt, a kis mennyiségben keletkező gyártási hulladékot visszaadják a technológiába.

A pórusbetontömbök szilárdulási folyamatát autoklávolással lehet meggyorsítani. 185–190 °C-on, 11–12 bar telített vízgőzatmoszférában még azok a folyamatok is néhány óra alatt lejátszódnak, amelyek atmoszférikus körülmények között egyáltalán nem, vagy csak nagyon hosszú idő után mennének végbe.

Egy autoklávba egyszerre 6 db érlelő kocsi, vagy 18 db tömb fér. Az érlelő kocsikkal megtelt autoklávot először légmentesen lezárják, majd elkezdik a vákuumozást. A vá-

kuumszivattyú kiszívja az autoklávból és a tömbök belsejéből a levegőt, ezáltal könnyebbé válik a gőz bediffundálása a pórusbeton tömbökbe. Vákuumozás után fokozatosan nyomás alá helyezik az autoklávot. Az ún. felgőzölés (nyomásnövelés) energia megtakarítási szempontok miatt három lépcsőben történik. A 12 baros nyomás elérése után 6–7,5 órán keresztül „érlelik" a tömböket. ekkor alakulnak ki azok a fázisok (tobermoritok), amelyek termékeink kiváló nyomószilárdságát biztosítják. A hőn tartás után három lépésben nyomásmentesítjük (legőzöljük) az autoklávokat. A legőzölés során mindig gondosan ügyeljünk arra, hogy a lehető legtöbb hőenergiát visszanyerjük. A 9 db autokláv mindenkori optimális működését egy számítógép irányítja.

Az autoklávolás befejezése után az érlelő kocsikat a tolópad vonszoló berendezése húzza ki az autoklávból, majd a tolópad viszi a kocsikat a megfelelő kicsomagoló vagy kitároló sínpályához.

Az YTONG építőelemek – az autoklávolás befejeztével – 15–25V%-nyi nedvességet tartalmaznak. A falak nedvességtartalma légszáraz állapotban 3–7 V% lesz. A kapilláris vízfelszívás ellen szigetelő réteggel kell védekezni ugyanúgy, mint a téglafalazatoknál. A csapóesőtől a falazatot víztaszító, de páraáteresztő vakolattal kell védeni.

A falazást megkönnyítik a méretpontos falazóelemek, az elemek egyszerű fűrészelhetősége és az épületgépészeti, valamint az épületvillamossági hornyok gyors, egyszerű kialakíthatósága.

A falazás elkészíthető hagyományos falazóhabarccsal is, de árusítanak YTONG hőszigetelő falazóhabarcsot, amelyet a többi szárazhabarcshoz hasonlóan zsákokban, raklapokon szállítanak.

Felületképzéshez hagyományos, illetve zsákolt, ún. szárazhabarcsok egyaránt használhatók.

A szerkesztési szabályok szerint falazáskor az elemek minimális átfedésének 12,5 cm-nek kell lennie.

A fő termék az YTONG falazóelem, amelynek választékát a *24.3. táblázat* szemlélteti.

Az YTONG falazatok hőszigetelő képessége kiváló, ilyen falazóelemekből épített vakolatlan falszerkezettel akár $k = 0{,}4$ W/m^2 K hőátbocsátási tényező is elérhető.

Gyártanak speciális építőelemeket is nyílásáthidaláshoz, a koszorúk hőhídmentessé tételéhez és falak hőszigetelő képességének javításához (*24.4. táblázat*). Főfalak nyílásáthidalását az YTONG zsaluelemben helyszínen készített hagyományos vasalású kiváltóval oldották meg, míg a válaszfalak kiváltó gerendáját a gyárban előre gyártják, vasalását hagyományos betonba ágyazzák és azt az YTONG elembe öntik.

A kiváltó monolitikus vasalt beton, amelynek a hőhídmentesítését YTONG elemekkel oldották meg. Az YTONG hőpáncél megnevezésű elemmel szinte tetszés szerint javítható a falak hőszigetelő képessége.

24.3. táblázat. YTONG falazóelemek
[YTONG alkalmazási útmutató (1995) alapján Józsa Zsuzsanna]

Termék megnevezése	Típusjel	Méret (mm) h × m × sz*	Elem tömege kg/db	Hőátbocsátási tényező, W/m²K	Nyomószilárdság N/mm²	Habarcsszükséglet, falm²	Elemszám a rakatokban db/rakat	Alkalmazási terület
YTONG falazóelem	G2-0,5	500 × 200 × 200	12	0,70	2,5	13,3	56	külső és belső teherhordó falazatokhoz
		500 × 200 × 250	15	0,58		16,6	48	
		500 × 200 × 300	18	0,49		19,9	40	
		500 × 200 × 375	22,5	0,40		24,9	32	
	G4-0,6	500 × 200 × 200	15	0,86	5,0	13,3	56	
		500 × 200 × 250	18,8	0,70		16,6	48	
		500 × 200 × 300	22,5	0,60		19,9	40	
		500 × 200 × 375	28,1	0,49		24,9	32	
YTONG nútféderes, megfogóhornyos falazóelem	G2-0,5NF +GT	600 × 200 × 200	14,4	0,70	2,5	9,5	56	megegyezik a normál falazó elemekével, de gazdaságosabb, mert nem kell habarcs a függőleges fugákba
		600 × 200 × 250	18,0	0,58		11,9	48	
		600 × 200 × 300	21,6	0,49		14,3	40	
		600 × 200 × 375	22,5	0,40		17,9	32	
	G4-0,6NF +GT	600 × 200 × 200	18,0	0,86	5,0	9,5	56	
		600 × 200 × 250	20,5	0,70		11,9	48	
		600 × 200 × 600	27,0	0,60		14,9	40	
		600 × 200 × 375	28,1	0,49		17,9	32	
YTONG válaszfalelem	Gve	600 × 200 × 100	9,0	–	hajlító-húzó-szilárdság 0,4 N/mm²	6,4	120	Térelhatároló és válaszfalak építéséhez. A nútféderes elemeknél a függőleges fugákba nem kell habarcs
		600 × 200 × 125	11,2	–		8,0	96	
		600 × 200 × 150	13,5	–		9,6	80	
YTONG nútféderes válaszfalelem	Gve NF	600 × 200 × 100	9,0	–		4,75	120	
		600 × 200 × 125	11,2	–		5,95	96	
		600 × 200 × 150	13,5	–		7,15	80	
YTONG előfalazólap	Gef	600 × 200 × 50	3,5			3,20	208	belsőépítészeti takarások, elfalazások, épületgépészeti vezetékek burkolása, polcrendszer
		600 × 200 × 75	5,4			4,80	160	

Csomagolás: fa rakodólapokon, fóliasapkával letakarva, pántolva

Jelmagyarázat: * = h – hossz; m – magasság; sz – szélesség,

** = vakolatlan falnál hőszigetelő falazóhabarccsal falazva

24.4. táblázat. Speciális YTONG építőelemek
[Útmutató az YTONG építőelemekhez (1995) alapján Józsa Zsuzsanna]

Termék megnevezése	Típus-jel	Mérete: hossz × magasság × szélesség (mm)	Elem tömege kg/db	Betonkitöltés l/fm	Felhasználási terület
YTONG U zsaluelem nyílásáthidaláshoz	Gu 20	500 × 200 × 200 500 × 200 × 250 500 × 200 × 300 500 × 200 × 375	9,40 10,82 11,25 14,06	15,0 22,5 30,0 37,5	monolit kiváltók zsaluzata, teherhordó falak nyílásáthidalásához a terheléshez igazodó vasalással
	Gu 40	500 × 400 × 250 500 × 400 × 300 500 × 400 × 375	20,63 22,50 28,13	45,0 60,0 75,0	nagy fesztávú monolit kiváltók zsaluzata, teherhordó falak nyílásáthidalásához a terheléshez igazodó vasalással
YTONG nyílásáthidaló válaszfalakhoz	Gvá 90	1300 × 200 × 100 1300 × 200 × 125 1300 × 200 × 150	28,60 33,48 38,35	gyárilag	térelhatároló és válaszfalak 90 cm széles nyílásainak áthidalásához
YTONG koszorúelem	Gke	200 × 600 × (75 + 40) 200 × 600 × (75 + 25) 250 × 400 × (75 + 40) 250 × 400 × (75 + 25) 300 × 200 × (75 + 40) 300 × 200 × (75 + 25)	5,6 5,7 4,7 4,8 2,8 2,9	hővez.t.: YTONG: 0,16 W/mK üveggyapot: 0,038 W/mK	hőhídmentes koszorúk kialakítása 7,5 cm YTONG és 2,5 cm, ill. 4 cm üveggyapot
YTONG hőpáncél	Ghp	600 × 200 × (50 + 25) 600 × 200 × (50 + 40) 600 × 200 × (50 + 50)	3,8 3,9 4,0	hővez.t.: YTONG: 0,16 W/Mk üveggyapot: 0,038 W/mK	falszerkezetek utólagos hőszigetelése 5 cm YTONG és igény szerinti vastagságú üveggyapot alkalmazásával

Terhelésből, illetve hőhatásból eredő eltérő mozgású szerkezetek csatlakozásainál a repedésképződést a vakolatba helyezett üvegszövettel meg kell akadályozni. Az üvegszövet a szerkezet csatlakozási vonalát mindkét oldalon 25-25 cm-re fedje át.

Az útmutató szerint tipikusan ilyen helyeknek tekinthetők:

- fedetlen vasbeton szerkezetek környezete (pl. vázkitöltő falak, vasbeton áthidaló, koszorú stb.);
- válaszfal–teherhordó fal csatlakozás;
- válaszfal–mennyezet csatlakozás;
- erősen eltérő terhelésű falszakaszok csatlakozásának környezete;
- épületgépészeti hornyok (a fal vastagságának ¼-énél mélyebb horony esetén a horonnyal átellenes oldalon is célszerű alkalmazni!);
- előfalazó lapokból készített belsőépítészeti takarás csatlakozása fal- és födémszerkezethez.

Az Útmutató az YTONG építőelemekhez 23 példában vázlatokat adott a szerkezeti megoldásokhoz és megadta az YTONG falazóelemekből készített falak akusztikai szempontból helyes megoldásait. A függelék pedig a falak és az áthidalók méretezéséhez adott tervezési segédletet és ismertette az épületgépészeti hornyok kialakításának általános szabályait.

A privatizáció során 1992. július elsején a szocialista tulajdonban lévő Mátra Gázbetongyárat a Readymix-YTONG konzorcium vette meg. 2003-ban a Readymix eladta a pórusbetongyárakat, így a halmajugrai gyárat is a Haniel család tulajdonában álló cégcsoportnak. Az új tulajdonos létrehozta Xella Baustoffe GmbH-t, amelyhez 25–30 európai YTONG és Hebel pórusbetongyár, valamint 50–55 mészhomoktéglagyár tartozott. A halmajugrai gyár először megtartotta az YTONG Hungary Kft. nevet, de 2005-ben átalakult Xella Pórusbeton Magyarország Kft-vé, majd 2006-ban nevét Xella Magyarország Építőanyag Kft-re változtatta, mert időközben felépült Iszkaszentgyörgyön a cég új mészhomoktéglagyára.

Az új, nagyobb hőszigetelési igények kielégítése, illetve a társvállalatok magas műszaki színvonalú termékeinek hazai importja a 2000-es évektől folyamatos termékskála-bővülést eredményezett. Ennek hatására jelentek meg a hazai piacon a vasalt elemes födém, ferdefödém, falpallók, illetve a teherhordó áthidalók is.

Ahogy a piac egyre inkább a jó hőszigetelési megoldások felé fordult, és a gyártástechnológia korszerűsödött, csökkent az YTONG P2-0,5 testsűrűsége 490-ről 440 kg/m^3-re, ezzel párhuzamosan a falazóelemek hővezetése is csökkent. A 2006 szeptemberében életbe lépett energetikai rendelet, az építési engedélyezési folyamatok szigorodása, illetve az energiaárak drasztikus emelkedése megmozgatta az építőanyagipart is. 2008-tól még mindig a 30 cm-es falvastagságot eredményező falazóelemekből értékesítenek a legtöbbet, de már egyre nagyobb az igény a 37,5 cm-es falazóelemek iránt.

Németországban 2005-re fejlesztették ki az YTONG Multipor nevű pórusbeton hőszigetelő táblákat, melyet eleinte tűzoltóhabbal „kelesztettek", később átálltak az alumíniumpasztás megoldásra. Az YTONG Multipor testsűrűsége 115 kg/m^3, hővezetési tényezőjének tervezési értéke 0,045 W/mK, tehát a hőszigetelő anyagokkal azonos. Magyarországon 2008 szeptemberétől kerültek forgalomba a Németországban Stullnban, majd a Köln melletti Porzban gyártott hőszigetelő elemek. A termék nagy előnye, hogy tisztán ásványi anyagokból áll, nem éghető, mérettartó és környezetbarát, valamint alkalmazásával nem romlik, hanem számos esetben javul is a meglévő falazat hangszigetelése. Nagy pórustartalmának és nagy kapilláraktivitásának köszönhetően – kellően méretezve – belső oldali hőszigetelésként is használható külön párazáró réteg beépítése nélkül. Az YTONG Multipor lapokat 600 mm hosszban, 390 mm magassággal és 50, 60, 80, ..., 200 mm vastagságban gyártják.

2009-ben a halmajugrai YTONG Falazóelemgyárban a korábban csak német piacra gyártott kisebb, 400 kg/m^3 testsűrűségi osztályba tartozó termékeket a magyar piacra is elkezdték kereskedelmi mennyiségben gyártani YTONG A+ „teherhordó hőszigetelés" néven. A kisebb testsűrűségű elemek nagyobb kovasavtartalmú

homokkal készülnek, így a gőzszilárdítás során – a nagyobb mennyiségű tobermoritkristálynak köszönhetően a nyomószilárdság a testsűrűség csökkenésével nem változott. Az A+ termékekkel a 37,5 cm vastag falazat hőátbocsátási tényezője $U = 0{,}30$ W/m^{2}K érték alá csökkent.

Az újonnan gyártott YTONG A+ termékek és az YTONG Multipor kombinálásával 2009 tavaszán passzív ház falazatot fejlesztettek ki, mely kizárólag pórusbeton termékeket használ. Ennek eredményeként az $U = 0{,}11$ W/m^{2}K hőátbocsátási tényező is elérhetővé vált.

24.4.2.4. Habcement

(*Sántha* Béla tájékoztatása)

Habbetont először Bayer dán mérnök készített 1924-ben, ma nemcsak a fejlett világban használják. Magyarországon készítésére, fejlesztésére Kaposvárott, 1989-ben alakult meg a BauMix Kft.

A habbeton a sejtbetonok egyik fajtája, amelynek legfeljebb 2 mm átmérőjű, zárt sejtekből álló sejtszerkezetét habképzőszerrel állítják elő. A régebbi nevezéktanban a habbeton a habképzővel és cement kötőanyaggal készített sejtbetont, a habszilikát a habképzővel és mész kötőanyaggal készített sejtbetont jelentette. Újabban a habbeton elnevezés szinonimája a habcement, amelynek értelmezése lehet, hogy ennek a könnyű építőanyagnak a kötőanyaga habosított cementkő.

A habbeton könnyű, többnyire folyós, habarcs jellegű (tehát voltaképpen nem beton) anyag, amelynek kötőanyaga cement, adalékanyaga homok, pernye, kohósalak, duzzasztott anyagkavics, polisztirolgyöngy, de készülhet esetenként adalékanyag nélkül is (ilyenkor egyértelmű a habcement elnevezés).

A legelterjedtebb habképzők fő hatóanyagai a természetes vagy mesterséges tenzidek (felületaktív anyagok). A habképzők stabilizátort is tartalmaznak, hogy a nagy levegőtartalmú habbeton sejtszerkezetét a keverés, a bedolgozás és a kötés ideje alatt is megtartsa. A habot hagyományos, gyorsfordulatú, forgószerszámos habverő géppel vagy nagynyomású habképző célgéppel (habgenerátorral) lehet „felverni", és a keletkező kemény habot a megkevert friss habarcshoz, esetleg cementpéphez kényszerkeverőgépben kell hozzá keverni. Habbetont bizonyos habképzőkkel úgy is lehet gyártani, hogy a habképzőt öntik a gyorsjáratú keverőgépben lévő friss habarcshoz vagy cementpéphez. A keverési időt – ha a habarcskeverékhez a már felvert habot keverjük, akkor a homogenizálásnak, ha a habarcskeverékbe a habképzőt öntjük, akkor a habképződésnek megfelelően – meg kell növelni. A habbeton sajátos konzisztenciája folytán könnyen, sokszor tömörítés nélkül is bedolgozható, transzportbetonként is szállítható, szivattyúzható. Szilárdítása általában szabad levegőn történik, de hőkezeléssel vagy gőzöléssel (8 bar = 0,8 MPa alatti nyomáson) is végezhető.

A habbetonból többnyire természetes szilárdítású, monolit hőszigetelő rétegek készülnek, de készíthetők belőle előre gyártott elemek, illetve használható az üreges

elemek kitöltőanyagaként is. Alkalmazzák fagyálló és hőszigetelő kiegyenlítő, feltöltő rétegként födémeken és lapostetőkön (lejtést adó rétegként is), aljzatrétegként ipari és sportcsarnokokban, istállókban, alap- és teherhordó rétegként az út-, híd- és egyéb mélyépítésben. A habbeton konzisztenciájánál fogva alkalmas üregek, felhagyott csatornák, pincék, földalatti tartályok kiöntésére, csövek injektálására. A megszilárdult habbeton terhelés hatására nem tömörödik, ezért utak alatti közműárkok betemetésére is használható. A habbeton tulajdonságai az összetételtől függenek, amelyet az alkalmazási célnak megfelelően kell megválasztani (*24.5. táblázat*).

24.5. táblázat. A habbeton tulajdonságai

Száraz testsűrűség (kg/m^3)	28 napos nyomószilárdság (N/mm^2)	Hővezetési tényező (W/mK)	Rugalmassági modulus (kN/mm^2)	Zsugorodási tényező (%)
400	0,5–1,0	0,10	0,8–1,0	0,30–0,35
600	1,0–1,5	0,14	1,0–1,5	0,22–0,25
800	1,5–2,0	0,17–0,23	2,0–2,5	0,20–0,22
1000	2,5–3,0	0,23–0,30	2,5–3,0	0,18–0,15
1200	4,5–5,5	0,38–0,42	3,5–4,0	0,11–0,09
1400	6,0–8,0	0,50–0,55	5,0–6,0	0,09–0,07
1600	7,5–10,0	0,62–0,66	10,0–12,0	0,07–0,06

A habbetonból készített előre gyártott elemeket beépíteni csak akkor szabad, ha hátralévő, várható utózsugorodásuk már kisebb, mint 0,5 mm/m. A szabad levegőn szilárdított, laza rakatokba helyezett előre gyártott elemek ezt az állapotot két-három havi tárolás után érik el.

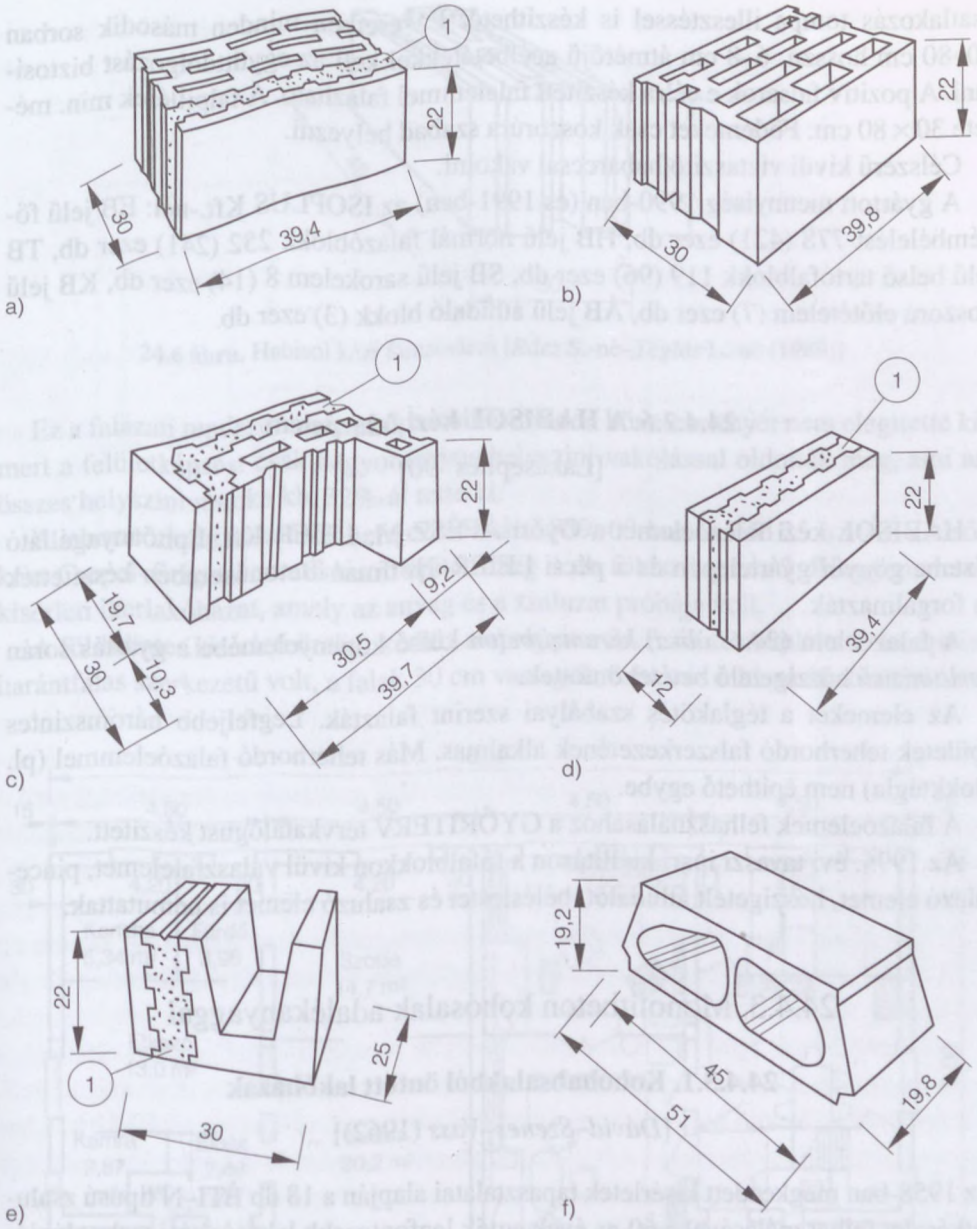
24.4.2.5. Hőszigetelt kohóhabsalak falazóblokk rendszer

[Lakásépítés '90]

Az ISOPLUS-DV falazóelem családot (*24.5. ábra*) az ISOPLUS Kft. (Dunaújváros), az ISOPLUS F falazóelem családot a Fertődi Építőipari Szövetkezet és a Tolna Megyei Építőipari Vállalat gyártotta és forgalmazta.

Az üreges falelemcsalád teherhordó részét *kohóhabsalak-betonból* (ISO-PLUS-DV) vagy kavicsbetonból (ISOPLUS F) készítették, a külső térelhatároló falelemek hőszigetelését *polisztirolhabbal* oldották meg.

A falazóelemekből lakó- (üdülő-) és hasonló használatú épületek teherhordó és hőszigetelő, valamint vázkitöltő falai építhetők a téglakötés hagyományos szabályai szerint. A falvastagság 30 cm. A falazóelem 40 cm-es hosszmérete miatt a javasolt falköztáv és a nyílászáró szerkezet szélességi méretei célszerűen 40 cm-rel oszthatók legyenek.



24.5. ábra. ISOPLUS-DV kézi falazóelem: *a)* HB jelű normál hőszigetelt falazóelem, *b)* hőszigetelés nélküli falazóelem, *c)* SB jelű sarokelem, *d)* KB jelű koszorú előtételem, *e)* ÁB jelű áthidaló blokk, *f)* EB 60/19 jelű födémbéléstest. Jelölés: *1*– hőszigetelés [*Rácz* S.-né–*Téglás* L.-né (1989)]

A falazóelemeket az egymás feletti sorokban kötésben kell elhelyezni. Javasolt átfedés 20 cm. Emiatt minden második sor feles elemmel fejezhető be. A T alakú csatlakozásoknál minden második sorban kell a teherhordó falat bekötni. A T alakú

csatlakozás tompa illesztéssel is készíthető. Ez esetben minden második sorban 60–80 cm hosszú, 6–8 cm átmérőjű acélbetétekkel kell az együttdolgozást biztosítani. A pozitív falsarok e célra készített falelemmel falazható. A falpillérek min. mérete 30 × 80 cm. Födémeket csak koszorúra szabad helyezni.

Célszerű kívül víztaszító habarccsal vakolni.

A gyártott mennyiség 1990-ben (és 1991-ben) az ISOPLUS Kft.-nél: EB jelű födémbélelést 778 (421) ezer db, HB jelű normál falazóblokk 252 (241) ezer db, TB jelű belső tartófalblokk 119 (96) ezer db, SB jelű sarokelem 8 (14) ezer db, KB jelű koszorú előtételem (7) ezer db, ÁB jelű áthidaló blokk (3) ezer db.

24.4.2.6. A HABISOL kézi falazóelem

[Lakásépítés '90]

A HABISOL kézi falazóelemet a Győri ÁFÉSZ-M. LEIER Kft. Építőanyagellátó Üzeme gönyűi gyártelepén és a pécsi LEIER–Hoffman Betonüzemben készítették és forgalmazták.

A falazóelem (*24.6. ábra) keramzitbeton* külső köpenyelemébe a gyártás során *perlitbázisú* hőszigetelő betétet öntöttek.

Az elemeket a téglakötés szabályai szerint falazták. Legfeljebb háromszintes épületek teherhordó falszerkezetének alkalmas. Más teherhordó falazóelemmel (pl. blokktégla) nem építhető egybe.

A falazóelemek felhasználásához a GYŐRITERV tervkatalógust készített.

Az 1995. évi tavaszi ipari kiállításon a főfalblokkon kívül válaszfalelemet, pincefalazó elemet, hőszigetelt áthidalót, béléstestet és zsaluzó elemet is bemutattak.

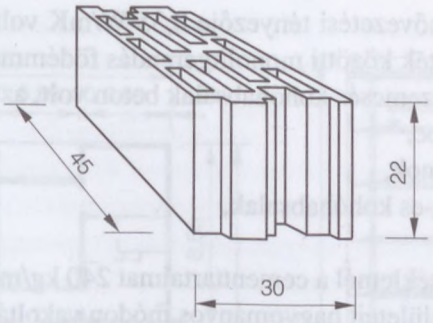
24.4.3. Monolitbeton kohósalak adalékanyaggal

24.4.3.1. Kohóhabsalakból öntött lakóházak

[*Dávid–Szenes–Vass* (1962)]

Az 1958-ban megkezdett kísérletek tapasztalatai alapján a 18 db ÉTI–N típusú zsaluzatkészlet felhasználásával a 60-as évek egyik legfontosabb lakásépítési technológiája a *kohóhabsalakbetonból,* öntött technológiájú volt, külső-belső monolit könnyűbeton teherhordó falakkal [*Ottmár–Petró* (1968)].

Előnyéül hozható fel, hogy munkaigénye kb. 75%-a, építési ideje kb. 80%-a, anyagfelhasználása kb. 90%-a volt a hagyományos építésű házakénak. A költség is kb. 14%-kal csökkent (*Kísérleti lakóépületek műszaki-gazdasági értékelése* c. ÉGSZI jelentésből).

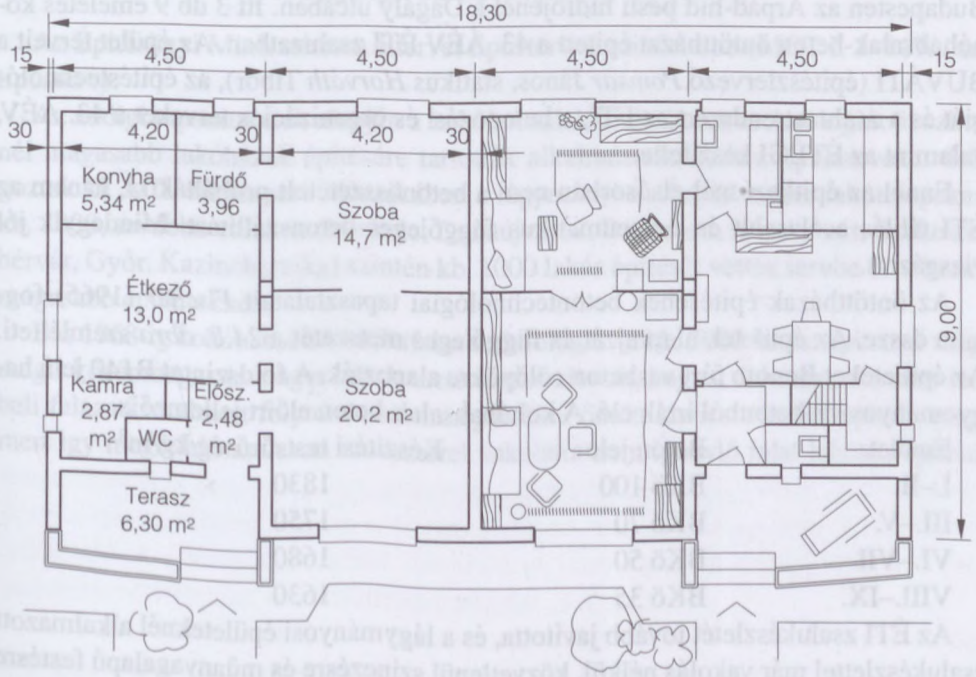


24.6 ábra. Habisol kézi falazóelem [*Rácz* S.-né–*Téglás* L.-né (1989)]

Ez a falazati rendszer az építésiparosítás minden követelményét nem elégítette ki, mert a felületképzést csak hagyományos helyszíni vakolással oldották meg, ami az összes helyszíni munka kb. 32%-át tette ki.

A laboratóriumi kutatások befejezése után 1959–60-ban az ÉM 25. sz. ÁÉV elsőként Csepel–Szigetszentmiklóson épített meg 4 db földszintes és 3 db egyemeletes kísérleti ikerlakóházat, amely az anyag és a zsaluzat próbája volt.

A földszintes kísérleti öntött ikerház alaprajzát a *24.7. ábra* szemlélteti. Az épület harántfalas szerkezetű volt, a falak 30 cm vastagok voltak és a kiszárított beton test-



24.7. ábra. Földszintes kísérleti öntött kohósalakbeton ikerház alaprajza [*Dávid* (1959)]

sűrűsége 1300 kg/m^3, hővezetési tényezője 0,35 W/mK volt. Az épület födémszerkezetét B60-as béléstestek közötti monolitgerendás födémmel tervezték. A tervezett beton BKö 35 jelű egyszemcsés kohóhabsalak beton volt, az alábbi összetétellel:

200 kg/m^3 C500-as pc,
100 kg/m^3 Duna-homok,
700 kg/m^{3}15/30 mm-es kohóhabsalak,
170 kg/m^3 víz.

0 °C alatti léghőmérsékletnél a cementtartalmat 240 kg/m^3-re növelték.

Az épület külső falfelületeit hagyományos módon vakolták.

Az egyemeletes öntöttházak alaprajza a földszintes házakéval egyezett meg [*Dávid* (1959)].

Ezt követte a többszintes épületek építéstechnológiájának a kipróbálása 1960-ban a Csepel-csillagtelepi kísérleti öntöttházon. Az épületet az ÉTI tervezte és kivitelezte. A betontermelés keverőgép, gyorsfelvonó és öntőkocsik hiányában igen vontatott, az öntőkocsi túl nehéz volt. A teljes kísérletet a hiányos berendezések miatt nem lehetett lebonyolítani.

Az ÉTI által közvetlenül irányított kísérleti öntöttházakon kívül az IPARTERV tervei alapján is építettek Budapesten, a Budaörsi úton 3 emeletes lakóházat vízszintes fatáblás zsaluzatban.

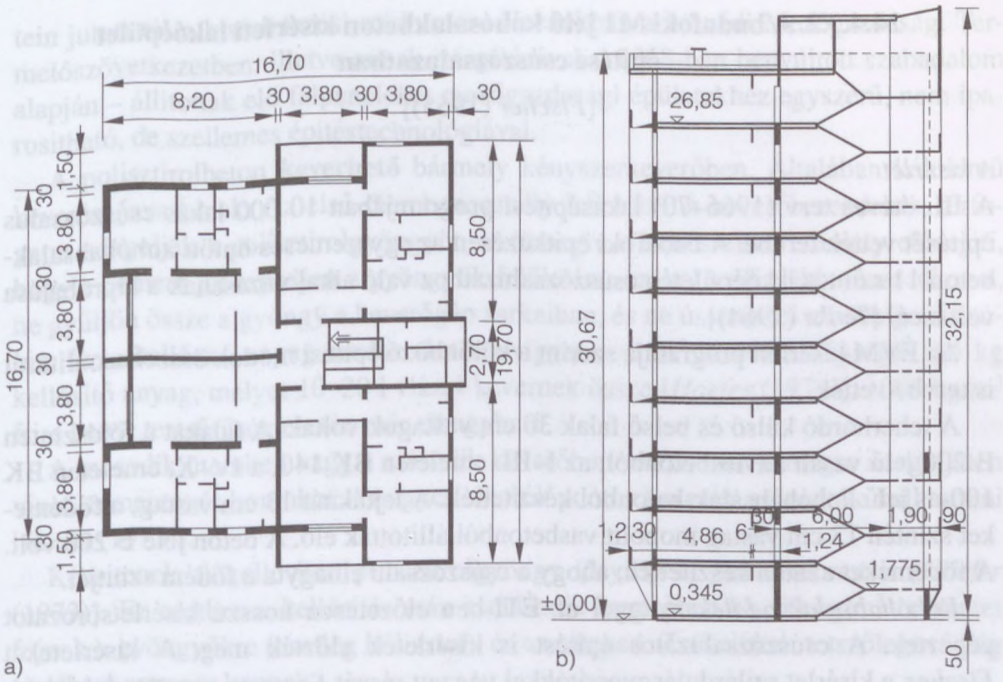
Középmagas öntöttházak ipari kísérlete 1961 második felében kezdődött meg Budapesten az Árpád-híd pesti hídfőjénél a Dagály utcában. Itt 3 db 9 emeletes kohóhabsalak-beton öntöttházat épített a 43. ÁÉV ÉTI zsaluzatban. Az épület terveit a BUVÁTI (építésztervező *Pomsar* János, statikus *Horváth* Tibor), az építéstechnológiát és a zsaluzatrendszert az ÉTI, a betonozási és organizációs terveket a 43. ÁÉV, valamint az ÉTÉGI készítette.

Ennél az építkezésnél elsősorban nem a betonösszetételt próbálták ki, hanem az ÉTI táblás acélzsalut és a pneumatikus függőleges betonszállítást. Mindegyik jól vizsgázott.

Az öntöttházak építésének betontechnológiai tapasztalatait *Fischer* (1965) foglalta össze. Az épületek alaprajzát és függőleges metszetét a *24.8. ábra* szemlélteti. Az épületeket Benoto fúrt vasbeton cölöpökre alapozták. A földszintet B140 jelű hagyományos vasbetonból írták elő. A kohóhabsalak-beton előírt jellemzői:

Emelet	Beton jele	Készítési testsűrűség kg/m^3
I.–II.	BKö 100	1830
III.–V.	BKö 70	1750
VI.–VII	BKö 50	1680
VIII.–IX.	BKö 35	1630

Az ÉTI zsalukészletét tovább javította, és a lágymányosi épületeknél alkalmazott zsalukészlettel már vakolás nélkül, közvetlenül színezésre és műanyagalapú festésre alkalmas falfelületeket értek el.



24.8. ábra. A Budapest Árpád híd pesti hídfőjénél megépített 9 emeletes öntöttházak alaprajza (a) és függőleges metszet (b) [*Fischer* Gy. (1963)]

Az Építésügyi Minisztérium a tervet típustervvé minősítette (MOT I. 1–167/a sz. típusterv).

Az addigi tapasztalatok alapján a kohóhabsalak öntöttbeton technológiát öt szintnél magasabb lakóházak építésére tartották alkalmasnak. Ehhez típusterveket dolgoztak ki. A II. ötéves terv időszakában a lágymányosi, Árpád-hídfői lakótelepeken kb. 1000, továbbá vidéken (Miskolc, Dunaújváros, Debrecen, Kecskemét, Székesfehérvár, Győr, Kazincbarcika) szintén kb. 1000 lakás építését vették tervbe öt szintnél magasabb épületekhez.

Bár 1968-ig kohóhabsalak öntöttfalas technológiával kb. 3000 lakást építettek meg, mégis középmagas és magas házak esetén indokolt volt, hogy a dobozszerű merev térbeli falazati rendszert folytonos szemmegoszlású öntött kavicsbetonból építsék meg, mert így megfelelő zsaluzati rendszerrel vakolatot nem igénylő falat lehetett építeni.

24.4.3.2. A budafoki M1 jelű kohósalakbeton kísérleti lakóépület építése csúszózsaluzatban

[*Fischer* (1965)]

A kísérlet

A III. ötéves terv (1966–70) lakásépítési programjában 10 000 lakás csúszózsalus építését vették tervbe. A budafoki építkezésen az egyszemcsés öntött kohóhabsalakbeton 11 szintes lakóépületen csúszózsaluzathoz való alkalmazásának a kipróbálása volt a cél [*Tenke* (1964)].

Az ÉVM kísérleti programja szerint a különböző építési módok összehasonlítását is tervbe vették.

A teherhordó külső és belső falak 30 cm vastagok voltak. A falakat a földszinten B 200 jelű vasalt kavicsbetonból, az I–III. emeleten BK 140, a IV–X. emeleten BK 100-as jelű kohóhabsalak-betonból készítették. A lejtaknát 13 cm vastag, a födémeket szintén 13 cm vastag monolit vasbetonból állították elő. A beton jele B 200 volt. A födémeket azután készítették, ahogy a csúszózsalu elhagyta a födém szintjét.

*Kohóhabsalak adalék*anyaggal az ÉTI-ben előzetesen hosszú kísérletsorozatot végeztek. A csúszózsaluzatos építést is kísérletek előzték meg. A kísérleteket *Fischer,* a kísérlet szilárdulásgyorsítókkal végzett részét *Somogyi* vezette. A kísérleteket *Fischer* (1965) részletesen ismertette.

A kísérlet eredményei:

- közepes intenzitású tömörítés esetén a cement tömegére vonatkoztatott 2% $CaCl_2$ + 2% Kerasol adagolással érték el a legkedvezőbb kezdeti szilárdságot, amely a zsalucsúszáshoz szükséges volt;
- hőszigetelési szempontból a pernyét és őrölt granulált kohósalakot tartalmazó összetétel volt a legkedvezőbb;
- a jó tömöríthetőséget, a vakolatmentes felületet olyan kétfrakciós (0–7 és 7–15 mm) kohósalakkal lehetett elérni, amelyben a 0–7 mm-es frakció legalább 30 m% 0–1 mm-es finomrészt tartalmazott.

A kiszárított beton hővezetési tényezője $\lambda = 0{,}47$ W/mK volt.

24.5. Polisztirolbeton

[*Balázs–Kovács–Papp* (1975), *Balázs* (1976)]

24.5.1. Alapismeretek

Új építőanyagunk volt az 1970-es évek elején a polisztirolgyöngy-adalékanyagos könnyűbeton, röviden polisztirolbeton. A beton a műanyaghab adalékanyag által válik könnyűvé. Ez a betonfajta 1970-ig külföldön is csak a magasépítés egyes terüle-

tein jutott túl a kísérletezési stádiumon. Hazánkban a hernádi Mezőgazdasági Termelőszövetkezetben, illetve annak irányításával – 1968-ban benyújtott szabadalom alapján – állítottak elő falpaneleket mezőgazdasági épületekhez egyszerű, nem iparosítható, de szellemes építéstechnológiával.

A polisztirolbeton **keverhető** bármely kényszerkeverőben. Általában kétütemű keverést javasolnak. Az első ütemben, amely lehet külön keverőberendezés, térfogatra adagolják a polisztirolgyöngyöt, és tömegre a kellősítőszert, amely elősegíti, hogy a cement jól tapadjon a gyöngyök felületére, ezáltal szilárdabb vázat alkotva, ne gyűljön össze a gyöngy a keverőgép sarkaiban, és ne ússzon fel a bedolgozás során. Ez a kellősítő anyag rendszerint epoxigyanta. 1 m^3 betonba elégséges 0,5 kg kellősítő anyag, melyet 10–20 l vízzel kevernek össze [*Hoefer* (1973)], 1000 kg/m^3 friss beton testsűrűség esetén már elhagyható.

A második ütemben vagy a második keverőben sorrendben tömegre adagolják a vizet, cementet és homokot. Az egyes alkotók pontos keverési arányát be kell tartani [*Baum* (1973)].

Készítenek előkellősített polisztirolgyöngy (Styropor) granulátumot is [*Hoefer* (1973)]. Ez esetben a kellősítés után a második keverőben kb. 50 kg/m^3 cementet fújnak a gyöngyökre (esetleg kőlisztet), és az rátapad. Zsákolható, tetszőleges ideig tárolható anyagot kapnak.

Vannak gépláncok, melyek a habosítás, pihentetés, kellősítés, keverés műveleteit egy munkafolyamatban végzik el. Az ilyen géplánc gazdaságos az útépítésben és az előregyártásban.

Szállítható a közönséges betonnál szokásos szállítóeszközökkel, a szétkeveredés és összetömődés veszélye nélkül.

600 kg/m^3 testsűrűség felett jól használhatók a **szokásos tömörítő eszközök,** leginkább a külső (rázóasztal, lapvibrátor, zsaluvibrátor) vibrálás. 600 kg/m^3-nél kisebb testsűrűség esetén szokásos a deszkadöngölő használata. Jó eredmény érhető el a vibrálással egyidejű felületi terheléssel. Hatásosnak bizonyult a 6000 ford/perc vibrátor használata [*Baum* (1973)].

A polisztirolbeton-felületek a simítás után is durvák maradnak, mivel a gyöngyszemek gurulnak a simítóeszköz alatt, különösen kis testsűrűség esetén. Felhordhatunk a friss felületre vékony habarcsréteget.

A vakolat jól tapad a betonfelületre. A kész beton fűrészelhető, marható. A polisztirolbeton is gondos nedves utókezelést igényel. Szokás a friss betonfelület befedése műanyag fóliával. Ugyanis, ha nem gátoljuk meg a betonfelületen a víz elpárolgását, akkor a beton kiszáradhat, mivel belső felmelegedése miatt a kötetlen víz a hidegebb betonfelület felé diffundál.

A cement hidratációhője következtében a polisztirolbeton 80–100 °C-ra is felmelegedhet. Ugyanis a cementtartalom annyi vagy több, mint a közönséges betonban, de a felmelegítendő tömeg sokkal kisebb, továbbá a polisztirol miatt jó a beton hőszigetelő képessége, végül a megnövekedett hő miatt tovább gyorsul a szilárdulás és

a hőfelszabadulás. Tehát a betonfelület hőleadásának a szabályozása által a gőzölésnek megfelelő gyorsított szilárdulás jöhet létre anélkül, hogy a betont gőzölnénk [*Hoefer* (1973)].

24.5.2. Kísérleteink

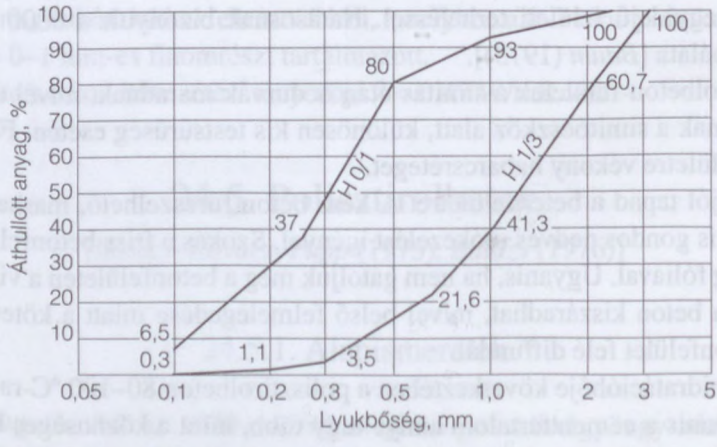
Hazánkban módszeres kísérleteket mi végeztünk az Építőanyagok Tanszékén elsőként. Kísérleteinknek az volt a célja, hogy az anyagtulajdonságok, az előállítási technológia jobb megismerése által elősegítsük a polisztirolbeton ipari alkalmazását. Hangsúlyozni szeretnénk, hogy hazánkban polisztirolgyöngyöt könnyűbeton céljaira nem állítottak elő, hanem csak polisztirolhab-lemezek készítéséhez közbenső termékként.

Kísérleteink során általában 4–6 mm átmérőjű, 18 kg/m^3 halmazsűrűségű, 2 m% vízfelvételű polisztirolgyöngyöt használtunk. Mivel a polisztirolgyöngyöt a polisztirolhab előállításához használták általában fel, ezért gyáraink a szemcseméretre különös tekintettel nem voltak. Néhány kísérlettel ellenőriztük a kb. 2 mm átmérőjű, 30 kg/m^3 halmazsűrűségű polisztirolgyönggyel a gyöngy méretének a beton tulajdonságaira gyakorolt hatását is.

Kutatásaink során a cement földnedves habarcsvizsgálattal megállapított 600-as minőségű volt.

A kutatások egy részében a polisztirolbetont polisztirolgyöngy, cement és víz összekeverése útján állítottuk elő. Más kísérleteink során ezeken kívül adalékanyagul kétféle osztályozott folyami kvarchomokot használtunk fel (*24.9. ábra*).

A kísérletek során a polisztirolgyöngyöt térfogatra, a többi anyagot tömegre adagoltuk. Változtattuk a beton összetételét, konzisztenciáját, a keverés módját, az érlelés módját, valamint a polisztirolgyöngy felületkezelésének módját.



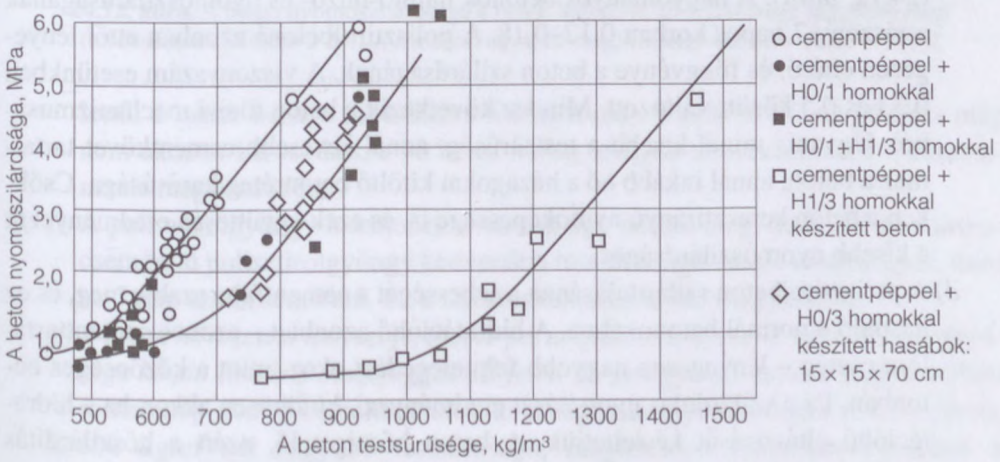
24.9. ábra. Polisztirolbetonhoz felhasznált homokok szemmegoszlása [*Balázs–Kovács–Papp* (1975)]

Általában esetenként 3–3 d db 7,07 × 7,07 × 25 cm-es hasábot készítettünk, melyet 7 napos korban, 21 cm-es támaszközön, harmadpontos erővel elhajlítottunk, majd az így keletkezett 6 db próbatest közül négyen a beton nyomószilárdságát (50 cm^2 felületű nyomólappal terhelve), kettőn pedig a kiszárított beton testsűrűségét határoztuk meg.

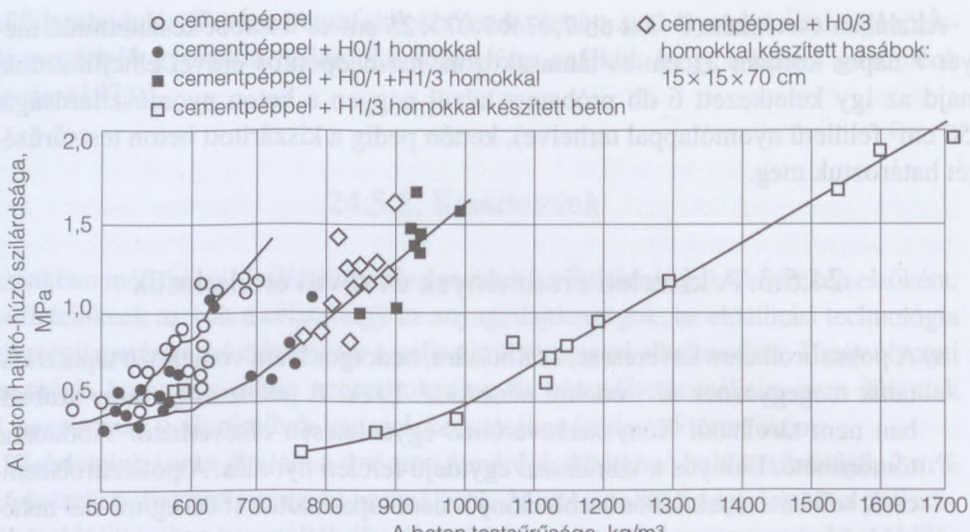
24.5.3. A kísérleti eredmények és rövid értékelésük

a) A polisztirolbeton keverésére, szállítására, bedolgozására vonatkozó tapasztalataink megegyeznek az irodalmi adatokkal. Ezek: A polisztirolgyöngy szabadban nem tárolható. Kényszerkeverőben egyenletesen elkeverhető. Vibrátorral tömöríthető. Előnyös a vibrálással egyidejű felületi nyomás. A polisztirolszemcsék kellősítésének különösebb előnyét nem tapasztaltuk (600 kg/m^3-nél nehezebb frissbeton esetén). Ezeken kívül megállapítottuk, hogy a beton préseléssel nem tömöríthető.

b) A 600 kg/m^3-nél nagyobb testsűrűségű polisztirolbeton *testsűrűsége és nyomó-, illetve húzószilárdsága között lineáris összefüggés áll fenn,* de az egyenes helyzete függ a szilárdságot adó pép, illetve habarcs minőségétől (*24.10. és 24.11. ábra*). A kis testsűrűséghez tartozó legnagyobb szilárdságot akkor kapjuk, ha a polisztirolgyöngy közötti üregeket csak cementpép tölti ki. Ez azonban nem cementtakarékos megoldás. Akkor kell alkalmaznunk, ha a polisztirolbetont hőszigetelő betonnak akarjuk felhasználni. A betont a gyakorlatban rendszerint 0/1, 0/3, illetve 0/5 mm-es homok felhasználásával készítik. Ebben az esetben – azonos testsűrűség esetén – lecsökken a szilárdság, tehát 750 kg/m^3-nél ki-



24.10. ábra. A beton nyomószilárdsága 7 napos korban a tömegállandóságig szárított beton testsűrűsége függvényében [*Balázs–Kovács–Papp* (1975)]



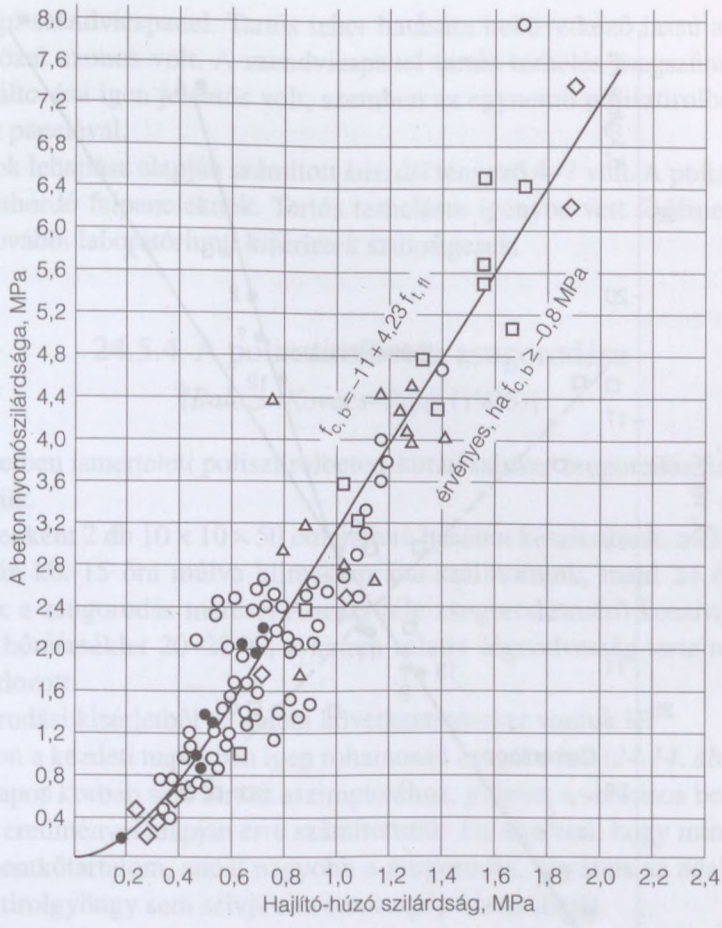
24.11. ábra. A beton hajlító-húzó szilárdsága 7 napos korban a tömegállandóságig szárított beton testsűrűsége függvényében [*Balázs–Kovács–Papp* (1975)]

sebb testsűrűségű betont nem érdemes előállítani. Még sokkal inkább romlik a szilárdság, ha a homokból hiányzik az 1 mm alatti rész. Az 1/3 mm méretű homokszemcsék nem férnek el a polisztirolgyöngyök közötti hézagokban, ezáltal nő a beton testsűrűsége. A gyakorlatban tehát ilyen polisztirolbetont nem érdemes előállítani, mivel a szilárdság nem nő, csak a testsűrűség.

c) A polisztirolbeton *nyomószilárdsága és hajlító-húzószilárdsága között* – a kezdeti rövid szakasztól eltekintve – *lineáris összefüggés áll fenn* közelítően (*24.12. ábra*). A hagyományos betonok hajlító-húzó- és nyomószilárdságának a viszony 7 napos korban 0,12–0,18. A polisztirolbetoné azonban ettől lényegesen eltérő, és függvénye a beton szilárdságának. A viszonyszám esetünkben 0,33 és 0,5 között változott. Mindez következik a beton törési mechanizmusából. Ugyanis minél kisebb a testsűrűség, annál kevesebb cementkövet tartalmaz a beton, annál inkább nő a hézagokat kitöltő betonréteg karcsúsága. Csökken a beton keresztirányú nyúlóképessége is, és ezek együttesen eredményezik a kisebb nyomószilárdságot.

d) A polisztirolbeton szilárdulásának a sebességét a cementfajta szabja meg, és ez hasonló a normál betonokéhoz. A hidratációhő azonban – azonos cementtartalom esetén – lényegesen nagyobb felmelegedést okoz, mint a közönséges betonban. Ez a szilárdulás gyorsítását eredményezi, különösen akkor, ha a hidratációhő eltávozását késleltetjük. A beton hőszigetelő, ezért a hőszilárdítás kisebb hatásfokú, mint a közönséges betonoké. A nedves utókezelés fontos.

e) 80 °C-os melegben, vagy gőztérben a próbatestek még nem mentek tönkre, 100 °C-os hőmérsékleten minden esetben eltűntek a polisztirolgyöngyök (felü-



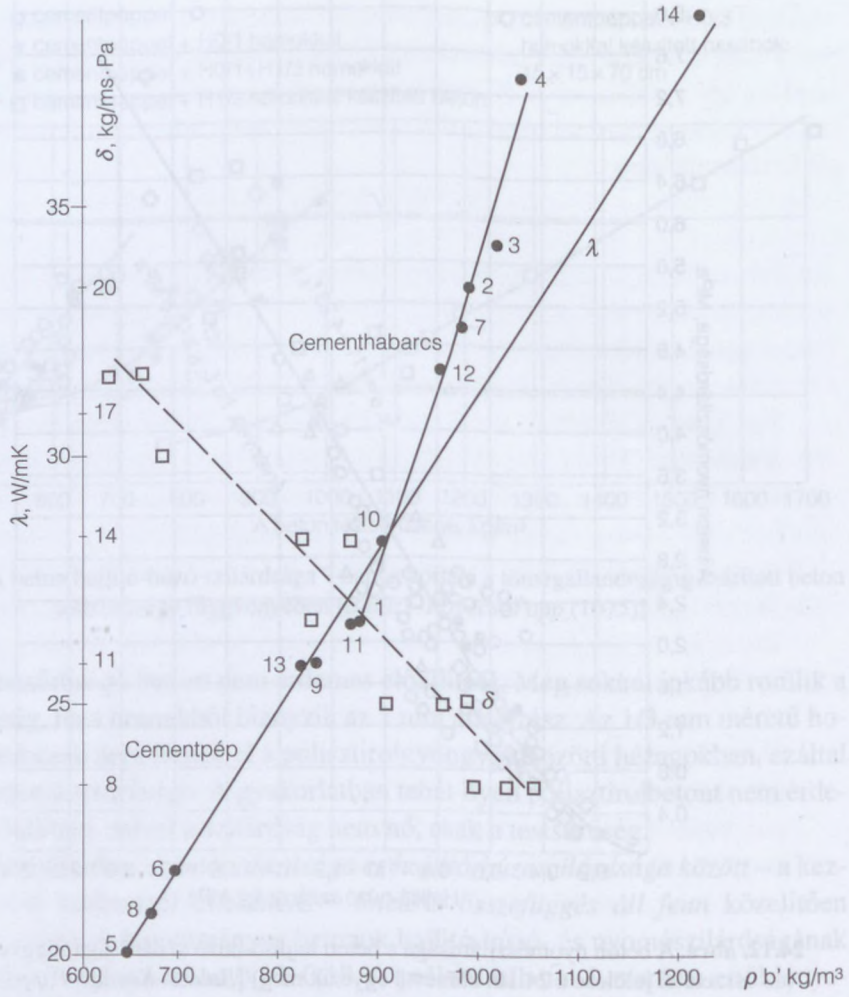
24.12. ábra. A beton nyomószilárdsága a beton hajlító-húzó szilárdsága függvényében (az összetétel jelölése a 24.10. ábráéval egyezik meg) [*Balázs–Kovács–Papp* (1975)]

lettől a beton belseje fel haladva fokozatosan). 6 órás 90 °C-os gőzölés még nem okozott károsodást, a 90 °C-os meleg levegőn tárolt szemcsék tönkremenetele megkezdődött.

f) A polisztirolgyöngy méretének a hatását úgy ítéljük meg, hogy a 2 mm szemcseméretű polisztirolgyöngy kedvezőbb tulajdonságú betont eredményez, mint az 5 mm szemcseméretű. Ez a törési mechanizmussal magyarázható.

g) A beton hővezetési tényezője, illetve páradiffúziós tényezője, valamint testsűrűsége között lineáris összefüggés áll fenn, de az egyenes hajlása függ a szilárd cementpép, illetve cementhabarcsváz hőtágulási együtthatójától (*24.13. ábra*).

h) 600 kg/m^3-nél nagyobb testsűrűségű, megfelelően tömörített betonban a *korróziós veszély* valószínűen nem nagyobb, mint a közönséges betonban. 1000 kg/m^3-nél nagyobb testsűrűség esetén pedig biztosan számítani lehet arra, hogy nem lép fel acélkorrózió.



24.13. ábra. Polisztirolgyöngy adalékanyagú beton hővezetési és páradiffúziós tényezője a kiszárított beton testsűrűsége függvényében [*Balázs–Kovács–Papp* (1975)]

i) A beton kezdeti rugalmassági modulusa – azonos testsűrűség esetén – annál nagyobb, minél kevesebb homokot tartalmaz a beton. Azonos hasábszilárdság esetén kisebb a péppel készített beton kezdeti rugalmassági modulusa a habarccsal készített betonénál. A könnyűbetonok kezdeti rugalmassági modulusát kifejező

$$E_{b0} = 6000\sqrt{\rho_b^3 f_c}$$

képlet polisztirolbetonra csak közelítően érvényes.

j) Négyféle (méretben, illetve összetételben eltérő) *vasalt panelt* vizsgáltunk statikus, illetve tartós teherre. A 20 cm vastag, 1100 kg/m^3 testsűrűségű panel adott statikus teherre lényegesen nagyobbat alakváltozott, mint az azonos vas-

tagságú szendvicspanel. Tartós teher hatására bekövetkező lassú alakváltozásuk közel azonos volt. A szendvicspanel tartós terhelés megszűnését követő alakváltozása igen jelentős volt, szemben az egynemű polisztirolbetonból készített paneléval.

A panelok lehajlása alapján számított *kúszási* tényező 4–7 volt. A polisztirolbeton alkalmas önhordó falpaneleknek. Tartós terhelésre igénybe vett födémek készítése előtt még további laboratóriumi kísérletek szükségesek.

24.5.4. A polisztirolbeton zsugorodása

[*Balázs–Kovács–Papp* (1975)]

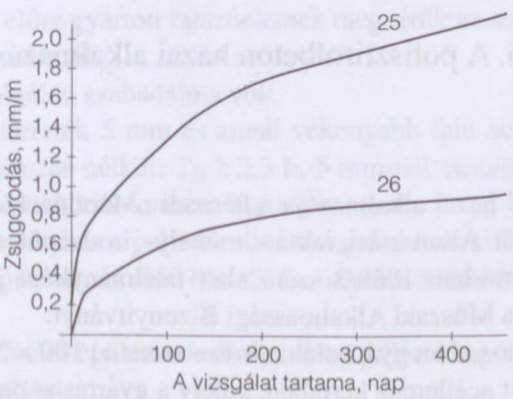
Előző fejezetben ismertetett polisztirolbeton-kutatásainkat zsugorodásvizsgálattal is kiegészítettük.

Keverékenként 2 db 10 × 10 × 50 cm méretű hasábot készítettünk, melyet az elkészítésük után kb. 15 óra múlva klímakamrába szállítottunk, majd 24 órás korban megkezdtük a zsugorodás mérését Amsler-féle zsugorodásmérő kocsival. A mérés tartamán a hőmérséklet 20–22 °C, a kamra relatív légnedvesség-tartalma 64–66% között ingadozott.

A zsugorodási kísérletből az alábbi következtetéseket vontuk le:

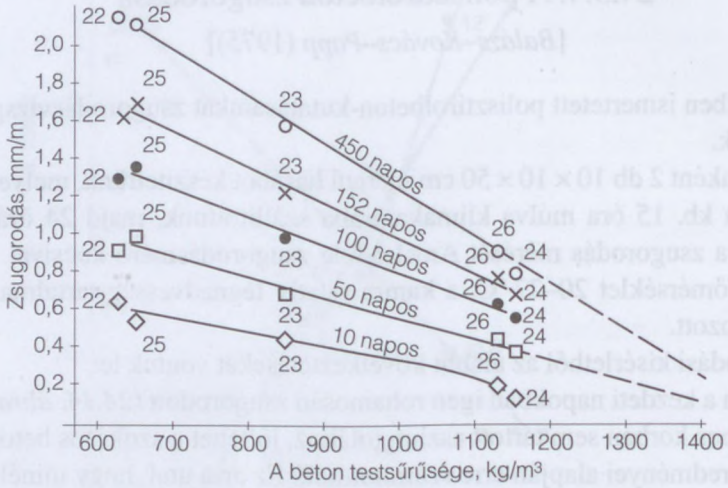
a) A beton a kezdeti napokban igen rohamosan zsugorodott (*24.14. ábra*), és még 100 napos korban sem tartott aszimptotához, jóllehet a szokásos betonok vizsgálati eredményei alapján erre számítottunk. Ez arra utal, hogy minél nagyobb a cementkőtartalom, annál nagyobb a zsugorodás. Továbbá az adalékanyag, a polisztirolgyöngy sem szívja el a cementpép víztartalmát.

b) A polisztirolbetonok zsugorodása – különösen 1000 kg/m^3 testűrűség alatt – lényegesen meghaladja a szokványos betonokét, amit nagyobb elemek tervezése során már figyelembe kell venni.



24.14. ábra. Polisztirolbeton zsugorodása a beton kora függvényében

c) *Új eredmény volt akkor, hogy a polisztirolbetonok zsugorodása és természetes állapotban mért testsűrűsége között lineáris összefüggést tapasztaltunk (24.15. ábra)*, ami a vizsgált testsűrűség-tartományig érvényes. Az 50, 100, 150 és 450 napos zsugorodási értékeket összekötő egyenesek az abszcisszán metszik egymást. A 10 napos zsugorodási érték esetén a 22, 25 és 23 jelű betonokét összekötő egyenes szintén a metszéspontba fut be. A 450 napos értékekből arra lehet következtetni, hogy ez a törvényszerűség a későbbi korban is fennáll, és a 450 napos korban megrajzolt egyenes a határegyenest megközelíti. (Ez csak a vizsgált tartományban érvényes.)



24.15. ábra. Összefüggés a polisztirolbeton testsűrűsége és zsugorodása között [*Balázs–Kovács–Papp* (1975)]

d) Az a különbség, hogy a polisztirolgyöngy mérete nem 2, hanem kb. 6 mm volt, de a beton testsűrűsége azonos volt, a zsugorodást nem befolyásolta.

24.5.5. A polisztirolbeton hazai alkalmazása

a) Önhordó falpanelok

A polisztirolbeton első hazai alkalmazója a hernádi „Március 15." Mezőgazdasági Termelőszövetkezet volt. Állattartási, raktár-, műhely-, irodaépületekhez használták. A panelszerkezetet 1968-ban 1068/3 szám alatt találmányként jelentették be. Az ÉMI 1977-ben adta ki a Műszaki Alkalmassági Bizonyítványt.

A panelokat két változatban gyártották, nevezetesen: *a)* $100 \times 250 \times 13$ cm méretű, falmagasságú sajtolt acéllemez keretben, amely a gyártás során sablonul is szol-

gált, két oldala rabichálóval volt ellátva; *b)* acélkeret nélküli merev acélsablonban az előírt méretben, két oldalán B 38.24 minőségű betonacéllal vasalva. A hosszvasbetétek átmérője 8 mm volt. Betonösszetétel: közelítően 600 kg/m^3 500-as cement, 0,8 m^3 polisztirolgyöngy, 250 kg/m^3 0,1–3(5) mm-es homok, képlékeny konzisztencia. Keverés forgódobos keverőben. Kézi tömörítés. A panelokat a beépítés helyén gyártották. A panelok egymáshoz csaphorogillesztéssel kapcsolódtak. A hézagokat kittel tömítették. A felületképzés a hagyományos falakéval egyezett meg. A megszilárdult beton testsűrűsége kb. 800 kg/m^3, kockaszilárdsága 2,5–3,5 MPa volt.

A találmány előnye, hogy így igen gyorsan, egyszerűen, gazdaságosan lehetett építeni. Újszerű volt a fal jó hőszigetelő képessége, amit az anyag jobb megismerésével javítani lehetett. Hátránya volt, hogy a polisztirolgyöngy méretét még nem szabályozták, nem volt kedvező méretű, tyúkólban a tyúkok kicsipkedték a polisztirolgyöngyöt.

b) Sokoldalú felhasználás kidolgozása a 21. ÁÉV-nél

(Alábbi ismeretanyagot túlnyomórészt *Sáfránné Kolos* Réka, a polisztirolbeton akkori legeredményesebb művelője és terjesztője bocsátotta rendelkezésemre.)

A 21. ÁÉV-nél 1976-ban kezdtek foglalkozni a polisztirolbetonnal, amit gyöngybetonnak neveztek el.

Az évekig tartó kísérletezések és próbagyártások során az alábbi felhasználási módokat dolgozták ki:

1. *GYV válaszfallap:* Blokkpréssel gyártott 30/70 cm méretű, két oldalon nútolt, két oldalon eresztékes falazóelemek.

Sima felületű, gyorsan falazható, állékony, jól szerelvényezhető, véshető, faragható, javítható falazatot adott.

Felhasználták Pécsett a SOTE felújítása során 1982-ben (kb. 1000 m^2).

Gyártó: Paksi Körzeti Építőipari Szövetkezet.

Kivitelező: Baranya megyei ÁÉV.

2. *GYT tűz- és korrózióvédő burkolat* (*24.16. ábra*)

5 cm falvastagságú, kézi erővel mozgatható méretű, kb. 800 kg/m^3 testsűrűségű betonból készített előre gyártott falazóelemek megvédik az acélszerkezetű pilléreket a tűz, nedvesség hatásától.

A 21. ÁÉV szolgálati szabadalma volt.

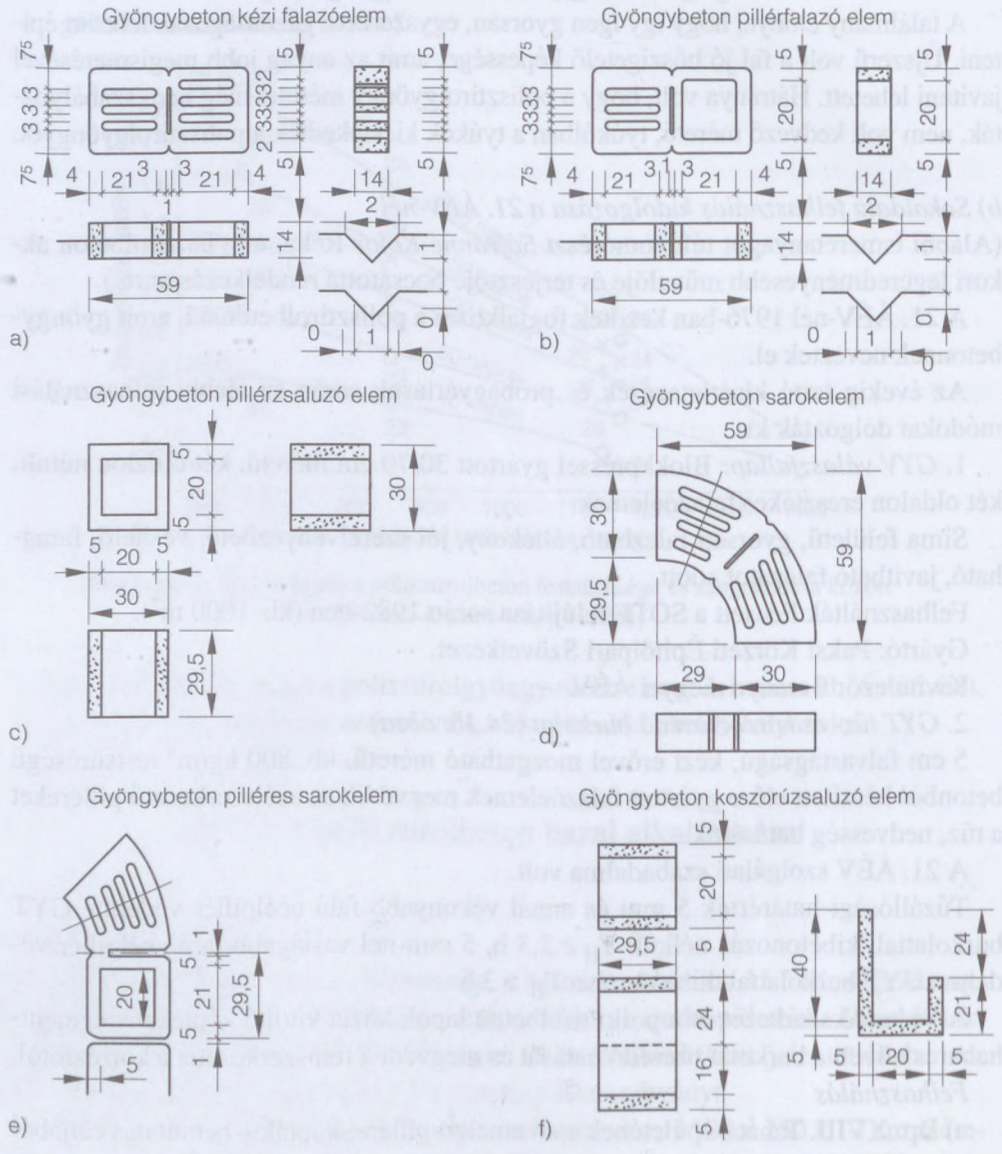
Tűzállósági határérték 5 mm és annál vékonyabb falú acélpillér védelme GYT burkolattal, kibetonozás nélkül: $T_H \geq 2{,}3$ h, 5 mm-nél vastagabb falú acélpillér védelme GYT burkolattal, kibetonozva $T_H > 3$ h.

A védendő szerkezet és a polisztirolbeton lapok közét kitöltő képlékeny cementhabarcs növeli a burkolat tűzvédő hatását és megvédi a fémszerkezetet a korróziótól.

Felhasználás

a) Bp. XVIII. Tanács épületének első emeleti pillérei kaptak – bemutatás céljából – GYT burkolatot.

b) Krisztina telefonközpont, Bp. XII. Városmajor u. 39. (1982). Itt is mintabeépítés volt két szinten.
Kivitelező: 21. ÁÉV.
c) Atomerőmű, Paks (1984–85)
A 3–4. blokk minden pillére GYT burkolatot kapott. Eredetileg csak 9 m magasságig, de a beruházó utólagos megrendelésére mind a 33 m magasságig. Mennyisége: kb. 20 000 m^2.



24.16. ábra. A 21. ÁÉV polisztirolbeton falazóelemei
[*Balázs* (2006)]

1993–94-ben az 1–2. reaktorban is ugyanilyen tűzvédő burkolattal vették körül az acélpilléreket (kb. 15 000 m^2).

Kivitelező: 22. ÁÉV.

3. *GYB–MINIVÁZ-építési mód*

A polisztirol gyöngybetonból készített építőelemek jó hőszigetelő képességű, kis tömegű, kézi erővel mozgatható, viszonylag nagy méretű, jól vakolható építőanyagok.

A laza szerkezetű könnyűbeton teherbírása csekély, ezért monolit vasbeton rejtett pillér/gerendavázat alakítottak ki, ami ismert módon, előre megtervezhetően viseli a födémterhet.

A GYB MINIVÁZ építési mód a legkisebb részletekig átgondolt, megoldott. A koszorú polisztirolbeton zsaluzóelemmel készül, kiküszöbölve a káros hőhidat. A falpillérek is bentmaradó zsaluelemekkel készülnek, hőhídmentesen.

Az elemválasztékot a *24.17. ábra* szemlélteti. A falazóelemeket feles kötésbe kell rakni, habarcsvastagság 1 cm H7 jelű habarcsból.

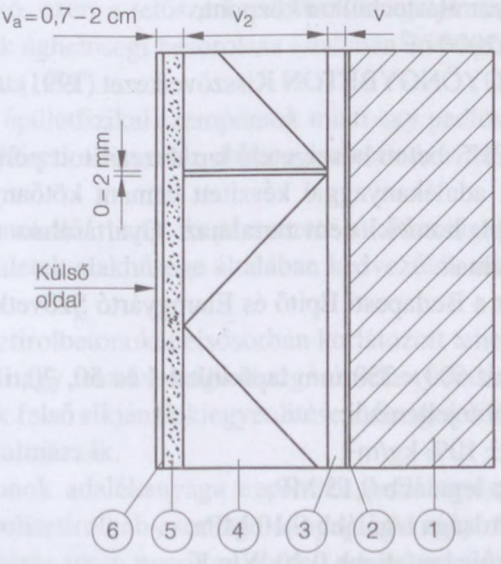
A pillérüreget a kézi falazóelemek egymásra helyezésével lehet kialakítani. A betonacél betonfedése legalább 2 cm. A kiöntőbeton B 200–16/K jelű.

A kézi falazóelemekből legfeljebb két szint + tetőtér építhető teherhordó falszerkezetként, továbbá építhetők vázas épületek kitöltőfalai.

Készíthető belőle lakóház, iroda, kereskedelmi és vendéglátó egység.

A 21. ÁÉV 181180. sz. szolgálati szabadalma (1980).

Feltalálók: *Sáfránné Kolos* Réka és *Huszár* Zoltán.



24.17. ábra. PSH-betonlap: *a)* a hőszigetelés rétegrendje, *b)* a beépített lapok (Termékismertető. Jelölés: *1* – szilárd alapszerkezet, *2* – kellősítő vékonyvakolat, *3* – ágyazó-habarcs, *4* – PSH-beton hőszigetelő lap, *5* – homlokzati alapvakolat, *6* – homlokzati fedővakolat vagy bevonat [*Balázs* (2006)]

A szabadalmas a GYÖNGY BT.

Gyártó: DUNA BETON Kft. Dunaszekcső.

Megépült házak:

– Mohácson és környékén 30 családi ház,
– Mohácson üzemi épület,
– Pécsett a Málomi városnegyedben 11 lakásos sorház (KISZ sajáterős kivitelezésű ifjúsági lakások 1986–87),
– Budapesten III. Szépvölgyi úton családi ház (1987).

4. *Tetőlejtbeton:* könnyű, jól megmunkálható építőanyag, elsősorban a lejtésmentes tetők felújításánál alkalmazták sikeresen.

Kb. 500 kg/m^3 testsűrűségű betonból készítettek lejtbetont szigetelés alá.

Ahol vastag réteg alakult ki, ott kikönnyítéssel készítették.

Építési példák:

– Dunaújvárosban két iskolatető,
– Budapesten ABC áruházak, iskolák teteje,
– Kispesti Erőmű üzemi épülete,
– SOTE több épülete,
– Szépművészeti Múzeum, Budapest,
– művelődési ház Újpesten, Lágymányoson,

Kivitelező: GYÖNGYBETON Kisszövetkezet 1987–92-ig.

5. *Szellőzőcsatornák tűzvédelmi burkolata:*

Építés helye:

– Budapest Bank számítástechnikai központ,
– Bp. Király u. kb. 2000 m^2

Kivitelező, gyártó: GYÖNGYBETON Kisszövetkezet (1991). A szövetkezet 1992-ben megszűnt.

PHS–betonlap. A PHS-beton hőszigetelő lap duzzasztott polisztirollap és (vagy) polisztirolhab darálék adalékanyaggal készített cement kötőanyagú könnyűbeton. Más adalékanyagot (pl. homok) nem tartalmaz. Gyártásához tehát polisztirolhab hulladékot is felhasználnak.

A hőszigetelő lapot a Budapesti Építő és Elemgyártó Szövetkezet gyártja és forgalmazza.

A PSH-betonlapokat 600 × 250 mm lapfelülettel és 50, 70, illetve 100 mm vastagságban gyártják. Főbb jellemzői:

– testsűrűsége 300 ± 10% kg/m^3,
– nyomószilárdsága legalább 0,15 MPa,
– hajlító-húzó szilárdsága legalább 0,10 MPa,
– hővezetési tényezője legfeljebb 0,10 W/mK,
– páradiffúziós tényezője legalább $0{,}02 \cdot 10^{-9}$ kg/msPa,
– lineáris hosszváltozása legfeljebb –0,3%,
– nehezen éghető, nem fagyálló.

Alkalmazása akkor célszerű, ha a falszerkezettel az előírt hőátbocsátási tényezőt nem lehet elérni. Ezt a burkolólapot a No-fines falazatok hőszigetelésének a javítására dolgozták ki, amikor a hőátbocsátási tényezőre vonatkozó előírások megszigorodtak és a hőszigetelést magával a fallal nem volt érdemes növelni. Alkalmas bármely rendeltetésű épület hőszigetelésének a javítására.

A PSH-betonlapot mindig a falazat külső felületén helyezik el. Beton- vagy téglafal hőszigetelésének rétegfelépítését a *24.17. ábra* szemlélteti.

Egyéb polisztirolbeton készítők voltak (az ismertetetteken kívül):

– Fővárosi 1. ÉV,
– Nyíregyházi ÉV,
– Lakásépítő Szövetkezet,
– Heves megyei TANÉP,
– Győri ÁFÉSZ gönyűi üzeme: Leier-betontéglák üregeit egészen könnyű polisztirolbetonnal töltik ki.

c) Polisztirolbeton gyártása 2010-ben

A polisztirolbetonokat elsősorban a magasépítésben, de esetenként a mélyépítésben és az előregyártásban is alkalmazzák.

A magasépítésben a polisztirolbetonok legjelentősebb felhasználási területe a lapostetők hőszigetelő és lejtést adó rétege, valamint a padozati rétegrendekben való alkalmazás. Lapostetőknél a polisztirolbeton javítja a tető nyári hőfokcsillapítását, biztosítja a csapadékvíz-szigetelés megfelelő lejtését, merev aljzatát, páragazdálkodó képességéből adódóan kedvezően befolyásolja a tetőszerkezet páradiffúziós működését. Nem éghető, ezért a tetőszerkezet tűzállósága javul, éghetősége csökken. A polisztirolbetonok éghetőségi besorolása általában 350 kg/m^3 légszáraz testsűrűség fölött „A2", alatta „B1".

Ha statikai vagy épületfizikai szempontok miatt egy padlószerkezet valamely rétegébe kerülnek a polisztirolbetonok, akkor a gyakorlatban azt az esztrich kategóriába sorolják.

A polisztirolbetonok hő-, hang- és páravezető tulajdonságai, zsugorodása, a belőlük készített sík felületek alakhűsége általában kedvezőbb, mint az azonos testsűrűségű habbetonoké.

A padozati polisztirolbetonokat elsősorban korlátozott teherbírású, nagy alakváltozást mutató, vagy nagy fesztávolságú mozgásérzékeny födémek, fafödémek, boltívek, tálcás födémek felső síkjának kiegyenlítése, hőszigetelése, hang- és rezgéscsillapítása céljából alkalmazzák.

A polisztirolbetonok adalékanyaga expandált polisztirolgyöngy vagy hulladék jellegű, expandált polisztirolhab-csomagolóanyag őrlemény. A gyöngyök a hőkezeléses duzzasztási eljárás során nyerik el eredeti szemcseméretüknek a kb. 40-szeresét, azaz a 2–5 mm közötti jellemző átmérőt. A duzzasztott anyag halmazsűrűsége ~12 kg/m^3, így pl. 10 m^3 habosított polisztirolgyöngy súlya ~125 kg, melyből ~8 m^3 beton készíthető.

A hulladék csomagolóanyag alapú őrlemények halmazsűrűsége hasonló, bár a felhasznált alapanyagtól függően esetenként elérheti a 25 kg/m^3-t is. Az őrlési technológiát általában úgy állítják be, hogy a 2–8 mm szemcseméretek közötti folytonos szemmegoszlású őrlemény adódjon. A csomagolási hulladék újrahasznosításának nagy jelentőségű környezetbarát jellegén túl az ilyen anyagnak megvan az az előnye, hogy a többnyire Távol-Keletről származó csomagolódobozokból a hosszú felhasználási kör következményeként a kémiai jellegű hajtóanyagok már elpárologtak, míg a frissen expandált gyöngyök esetében ehhez néhány hónap, várakozási időt célszerű betartani.

A polisztirolbetonok egy vagy két ütemben készülhetnek:

Az egy ütemben való készítésnél gravitációs vagy kényszerkeverőben előkészített, felületaktív anyagokkal kevert cementtejhez adagolják a műanyaghabpelyheket. A betongyárban vagy az építés helyszínén a készre kevert anyagot dolgozzák be.

A két ütemben történő készítés során az első ütemben a felaprított habanyagpelyheket vagy gyöngyöket egy kényszerkeverőben vékony rétegű adalékszeres cementtejjel burkolják be (pl. BauMix-Ökocell drazsír) vagy önmagában az adalékszer vizes oldatával felületkezelik. Az így kapott és zsákolt könnyűbeton adalékanyagot azután a felhasználás helyszínén vagy a betongyárban – azaz a második ütemben – megfelelő mennyiségű vízzel és cementtel esetleg még homokkal is keverik, hogy a kívánt célnak megfelelő tulajdonságú könnyűbeton készüljön. Adalékszeres cementtejjel általában a polisztirolhab őrleményeket burkolják be, melyek halmazsűrűsége gyártótól függően 50–100 kg/m^3 közötti, míg az adalékszerek vizes, esetleg pigmentált oldatával általában a gyöngyöket vonják be, melyek halmazsűrűsége így 25–30 kg/m^3 körülire adódik. A nagyobb halmazsűrűségű anyagok előnye, hogy az építéshelyszíni adagolás során a szélre, huzatra jóval kevésbé érzékenyek.

Az elérni kívánt funkciótól függően péphiányos vagy túltelített a polisztirolbeton:

A péphiányos keverékeket igen kis testsűrűség (100–400 kg/m^3), kedvező hő- és páravezetési tulajdonságok, esetenként kiemelkedő lépéshangcsillapítás jellemzi ($\lambda = 0{,}05 - 0{,}15$ W/mK, $\mu = 4 - 6$, $\Delta L_w = 25 - 28$ dB).

Ezek az anyagjellemzők lehetőséget nyújtanak arra, hogy olyan födémszerkezeteknél alkalmazzák a péphiányos polisztirolbetonokat, amelyeknek korlátozott a statikai terhelhetősége és a felső felülete nem sík; pontszerű vagy vonal menti kiemelkedések találhatók rajtuk (pl. a födém felülbordás, vagy a sík födémen gépészeti vezetékek találhatók), ezért táblás szigetelőanyag stabil módon nem fektethető le.

Gyakori alkalmazási terület még a padlásfödémek, nem járható lapostetők és hasznosított lapostetők (teraszok, zöldtetők, parkolótetők) hőszigetelő, páratechnikai, lépésálló és adott esetben lejtést adó rétegei.

A hőszigetelő és kitöltő céllal készített péphiányos polisztirolbetonoknál ($\gamma = 160 - 400$ kg/m^3) egyazon testsűrűséghez tartozó összetételek közül a kisebb cementtartalmúak nagyobb szilárdságúak, ami arra utal, hogy a nagyobb tömörítésű polisztirolhabszemcsés adalékanyagváz kisebb cementtartalommal is nagyobb ellenállást mutat az összenyomódással szemben, mint a kevésbé tömörített, de na-

gyobb cementtartalmú összetétel. Ezek a vizsgálati eredmények tendenciájukban megegyeznek Dr. *Ujhelyi* János eredményeivel, melyeket a 200–600 kg/m^3 testsűrűségű perlitbetonoknál (pl. MÉASZ ME 04.19:1995 14.4. ábra) tapasztalt.

A péphiányos polisztirolbeton felületét a bedolgozást követő egy órán belül PE-fóliával vagy simító habarccsal takarni kell.

A péphiányos keverékek közül a BauMix-Ökocell Csend kitöltő, hő- és hangszigetelő funkciójú cementkötésű polisztirolbetonja mindössze $\gamma = 100$ kg/m^3 száraz testsűrűségű, ugyanakkor a 2 kN/m^2 megoszló terhelés alatti összenyomhatósága (1,3 mm) megfelel az esztrich szabványokban az úsztatóanyagokra előírt max. 5 mm összenyomhatóságnak. Az anyag előírt minimális rétegvastagsága 7 cm. Az erre a polisztirolbetonra fektetett 2 × 5 mm vastag tekercselt filcréteg, illetve egy réteg 14 mm vastag ásványgyapot anyagú táblás szigetelőanyag + 5 cm normál sűrűségű cementesztrich rétegrendnél $\Delta L_w = 25$ dB, illetve $\Delta L_w = 28$ dB értékű lépéshangcsillapítást mértek.

A túltelített, ezáltal simítható felületminőséget adó polisztirolbetonok ($\rho_t = 1000$ kg/m^3) cement és a vízadagolására a testsűrűségtől függetlenül min. 350 kg/m^3-t, illetve 160 liter/m^3-t javasolnak. A felületkezelt polisztirolhab-szemcsék és a homok adagolásának változtatásával legkönnyebb beállítani a kívánt testsűrűséget. (*24.6. táblázat*)

A nagyobb kezdeti szilárdság és a mielőbbi burkolhatóság is megvalósítható, ha gyorskötő esztrichcementet és gyorsan száradó önterülő aljzatkiegyenlítőt alkalmaznak. A túltelített polisztirolbeton felületét 3 napig fóliatakarással célszerű védeni a kiszáradástól, a gyors zsugorodástól.

24.6. táblázat. Túltelített polisztirolbetonok jellemző értékei

Paraméter	Jellemző	Mérték-egység	Könnyűbeton jele (légszáraz testsűrűség alapján)			
			800	1000	1200	1400
Testsűrűség	készítési	kg/m^3	898	1094	1296	1484
	száraz		800	1000	1200	1400
Nyomószilárdság	3 napos	N/mm^2	1,0	1,4	2,8	5,1
	7 napos		1,2	2,0	3,5	6,1
	28 napos		2,0	2,8	5,0	9,0
Hajlítószilárdság	3 napos	N/mm^2	0,2	0,4	1,0	1,6
	7 napos		0,3	0,8	1,2	2,0
	28 napos		0,5	1,0	1,5	2,3
Rugalmassági modulus	28 napos	N/mm^2	2,400	3,100	5,000	7,800
Zsugorodás	5 napos	mm/m	0,10	0,10	0,10	0,10
	10 napos		0,36	0,30	0,25	0,20
	50 napos		1,10	0,86	0,70	0,64
	100 napos		1,26	1,0	0,78	0,70
Diffúziós szám	28 napos	μ	24	27	29	30
Hővezetési tényező	28 napos	W/mK	0,26	0,39	0,44	0,50

Napjainkban polisztirolbeton-termékeket és -keverékeket sokoldalú felhasználásra az Ökocell néven, a Bau Mix Kft. gyárt, *Terlaky* József vezetésével. Éves termelésük 35 000 m^3 polisztirolbeton és 5000 m^3 polisztirolgyöngy alapú hőszigetelő vakolat.

24.6. Habüveg adalékanyagú könnyűbetonok

Új könnyű adalékanyagunkról, a habüvegről a BME Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszék kísérletei alapján ismerhetünk meg legtöbbet. Ezeket használtam fel e fejezetekhez.

24.6.1. A habüveg adalékanyag

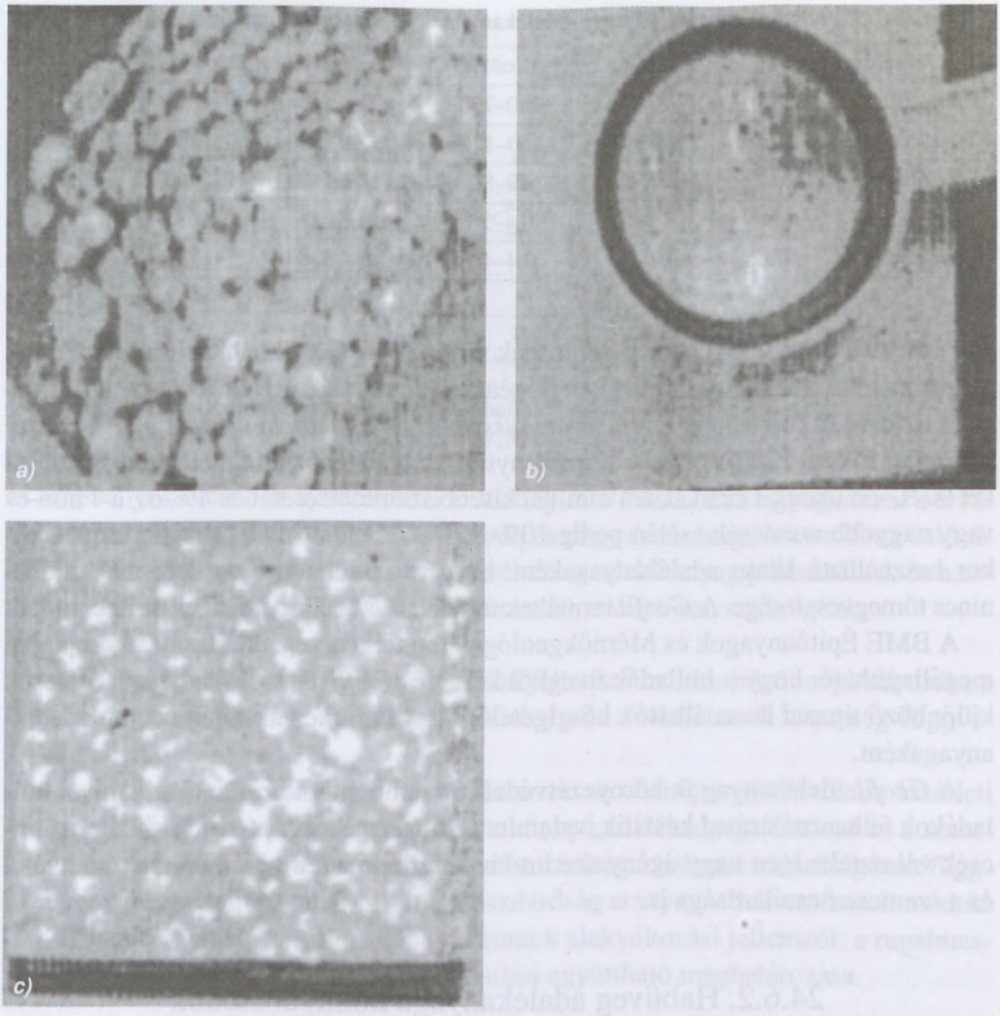
[*Hoffmann–Józsa–Nemes* (2003)]

Geofil-Bubbles néven habüveg-granulátumot készítenek nagy üvegtartalmú ipari és kommunális (csomagolási hulladék gyűjtéséből származó) hulladékokból. [(Feltaláló: *Hoffmann* L. és társai, Geofil Kft. Tatabánya). A találmány regisztrációs száma: PCT (HU99) 00017]. A hulladék üveg különböző szerves és szervetlen szennyező anyagokat (pl. élelmiszer-maradékot, papírcímkét, kupakot stb.) is tartalmazhat. A nagy üvegtartalmú hulladékot megfelelő szemcseméretűre őrlik, és az alapanyag összetételétől függően különböző mennyiségű gázképző hulladékkal homogenizálják. Granulálás olvadáspont-csökkentő és viszkozitásbeállító adalékokkal. A granulátumok külső felületének vízáteresztő képességét különböző fajlagos felületű hulladék anyagokkal szabályozzák. Szárítás után forgókemencében 800–1000 °C közötti hőmérsékleten hőkezelik.

Az így kapott habüveg granulátumok kis testsűrűségűek, jó hőszigetelő képességűek, jól tapadnak az ágyazóanyagként használt gipszhez, cementhez vagy szilikátgyantához. A gyártás során a szemcseméret *szabályozható,* 1 és 25 mm közötti átmérőjű szemcsék állíthatók elő (*24.5. fénykép*).

A terméknek három fő típusa van: a *Geofil A, B,* illetve *C.* Az *A* típus kis szilárdságú, nagy vízfelvételű (> 10m%), hőszigetelő könnyűbetonokhoz alkalmazható; a C típus kis vízfelvételű, legalább 4,5 MPa önszilárdságú, elsősorban szerkezeti könnyűbetonokhoz használható. A *B* pedig a kettő között átmeneti típus.

A BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékén végzett *laboratóriumi vizsgálatok* célja az volt, hogy ellenőrizzék a *Geofil* habkavics könnyű adalékanyagként való alkalmazhatóságát, és összehasonlítsák főbb fizikai és kémiai tulajdonságait a nemzetközi piacon már elterjedt, nálunk is beszerezhető *Liaver* (habüveg) és *Liapor* (duzzasztott agyagkavics) termékekkel. A prEN 13055-1 *Lightweight aggregates – Part 1: Lightweight aggregates for concrete and mortar (Könnyű adalékanyagok 1. rész: Könnyű adalékanyagok betonhoz és habarcshoz)* c. szabvány szerint vizsgálták, amennyiben az tartalmazott vonatkozó előírást. A vizsgálatok során 53 kü-



24.5. fénykép. Habüveg adalékanyagú beton metszete, a) egyszemcsés könnyűbeton; b) pórusbeton; c) adalékanyagos könnyűbeton

lönféle *Geofil* adalékanyagot vizsgáltak közel 70 mintán (eltérő szemcseméretttel, illetve felületi bevonattal). Összehasonlításul a *Liaver* legnagyobb szemcseméretű frakcióját (*Liaver*-B 2/4) és három különböző szilárdságú *Liapor* terméket (*Liapor* 3 4/8, *Liapor* 4 4/8, *Liapor* 6,5 4/8) vizsgálták azonos módon.

Vizsgálták:

– a halmazsűrűséget,
– a szemcsék önszilárdságát
– és vízfelvételét.

A vizsgálat eredményeit a *24.7. táblázatban* foglalták össze. A prEN 13055 szabvány nem írja elő a könnyű adalékanyagok alkáli érzékenységének vizsgálatát, de cementkötésű rendszerekben csak alkáliálló adalékanyag használható, ezért üvegtermé-

24.7. táblázat. A vizsgált könnyű-adalékanyagok tulajdonságainak összefoglalása

Adalékanyag-típus		Geofil A	Geofil B	Geofil C	Liapor	Liaver
Halmazsűrűség	kg/m³	150–500	260–750	600–1100	340–685	185
Testsűrűség	kg/m³	260–1000	460–1200	1000–1850	660–1280	329
Porozitás	%	55–80	40–80	14–50	49–74	86
Vízfelvétel	m%	10–55	0,4–25	0,1–2	22–46	56
Önszilárdság	N/mm²	0,2–1	0,4–4,7	4,5–15	1,5–10,5	1,35

kek esetében ezt a vizsgálatot is fontosnak tartották. A *Geofil* habkavicsminták és az összehasonlító minták alkáli érzékenységének jellemzésére a Német Vasbeton Egyesület módszerét használták (*Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie Alkalireaktion im Beton. 12/86*). Az alkáliérzékenység vizsgálatához a felmelegített szemcséket 90 °C-on főzték 1 órán át, a 4 mm-nél kisebb szemcsék esetében 4%-os, a 4 mm-es vagy nagyobb szemcsék esetén pedig 10%-os NaOH oldatban. A vizsgált termék akkor használható beton adalékanyagaként, ha nem puhul fel, nem deformálódik, és nincs tömegvesztesége. A *Geofil* termékek minden esetben megfelelőek voltak.

A BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékén végzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a hulladék üvegből készülő *Geofil-Bubbles* habüvegszemcsék különböző típusai használhatók hőszigetelő, illetve szerkezeti könnyűbeton adalékanyagaként.

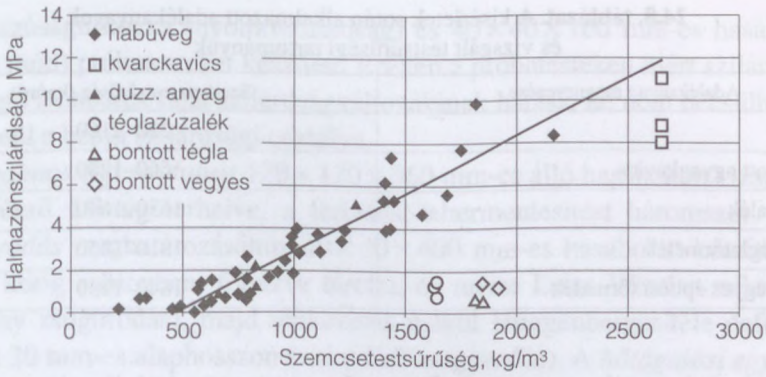
A *Geofil* adalékanyagok környezetvédelmi szempontból is jelentősek, mivel hulladékok felhasználásával készítik, valamint hazai termékek. A *Geofil* habüveg szemcsék választéka igen nagy, igény szerint kiválasztható a szemcseméret, a vízfelvétel és a szemcse önszilárdsága is.

24.6.2. Habüveg adalékanyagú könnyűbetonok

E fejezethez *Nemes* R. (2006) PhD-téziseit használtam fel.

24.6.2.1. Az értekezés célkitűzései

A habüvegnek korábban csak kis szilárdságú, kis testsűrűségű, nagy vízfelvevő képességű fajtája létezett. Ezekkel az elérhető kockaszilárdság 20 MPa alatt maradt (*24.18. ábra*). Ma már tudnak gyártani olyan habüveget, amely szerkezeti könnyűbeton készítését teszi lehetővé. Teherhordó szerkezetekben (híd- és magasépítés) napjainkban szinte kizárólag a duzzasztott agyagkavicsot alkalmazzák, így erre vannak kísérleti eredmények és tapasztalat, ezért az új könnyűbetonokra vonatkozó ajánlások



24.18. ábra. Különböző adalékanyagok halmazönszilárdsága a szemcsetestsűrűsége függvényében [*Nemes* (2006)]

és szabványok előírt, és ajánlott értékei többnyire a duzzasztott agyagkavicsra érvényesek. A habüveg adalékanyagok szerkezeti és nagy szilárdságú betonokban való alkalmazásához és szélesebb körű elterjedéséhez az adalékanyag jellemzőinek és a cementhabarcsban való viselkedésének részletes ismeretére van szükségünk.

Az értekezés célja

- A habüveg adalékanyagok mechanikai jellemzőinek kísérleti meghatározása a halmazönszilárdság, a szemcsetestsűrűség és a vízfelvevő képesség függvényében.
- A habüveg adalékanyagos könnyűbetonok mechanikai jellemzőinek kísérleti meghatározása: a nyomószilárdság, a könnyű adalékanyag-tartalom és a szemcsetestsűrűség függvényében; a nyomószilárdság a habarcs szilárdságának függvényében; a hajlító-húzó és a nyomószilárdság aránya; a tönkremeneteli módok.
- A habüveg adalékanyagos könnyűbetonok alakváltozási jellemzői: a rugalmassági modulus; a zsugorodás; a hőtágulási együttható meghatározása.

24.6.2.2. A kutatás módszere

Kutatásai során több gyártótól származó különböző habüveg adalékanyagtípust vizsgálta meg, majd csoportosította azokat főbb jellemzőik szerint és összehasonlította a leggyakrabban használt duzzasztott agyagkaviccsal és építési hulladékból származó könnyű adalékanyagokkal (*24.8. táblázat*). A habüvegeket három gyártótól választotta ki a lehető legszélesebb tartományban. Az adalékanyag-jellemzőket az EN 13055-1:2002, illetve előszabványai alapján határozta meg. A könnyű adalékanyagokat a terméknevek vagy a gyártó által használt jelölések alapján azonosította.

A kísérleti könnyűbetonokat minden esetben 0/4 mm-es frakciójú természetes kvarchomokkal készítette, a könnyű adalékanyaggal a kavics frakciót (> 4mm) he-

24.8. táblázat. A kísérletek során alkalmazott adalékanyagok és vizsgált testsűrűségi tartományuk

Adalékanyag megnevezése	Szemcsetestsűrűség (kg/m³)
Habüveg	220–2160
Duzzasztott agyagkavics	660–1280
Téglazúzalék	1630–1640
Bontott téglatörmelék	1810–1850
Bontott vegyes építési törmelék	1840–1930

lyettesítette. A használt cement minden esetben azonos gyártótól származó, 42,5-es szilárdsági osztályú tiszta portlandcement (CEM I 42,5 N) volt. A vizsgált betonok a szerkezeti könnyűbetonok csoportjába tartoznak, szilárdsági osztályuk LC 8/9–LC 50/55, testsűrűségi osztályuk 1,4–2,0 közötti (MSZ 4798-1:2004).

Az összetétel megtervezésekor az volt az alapelve, hogy a habarcs minden esetben azonos legyen és ehhez az *etalon habarcs*hoz adagolta a könnyű adalékanyagot. (Ebből következik, hogy különböző adalékanyag-mennyiség esetén a betonra vonatkoztatott cementtartalom változott.) Ezt a könnyűbetonra jellemző, a közönséges betonoktól eltérő teherhordási mód indokolta, mert így a habarcsvázat az azonos habarcsösszetétel miatt különböző adalékanyag-tartalom esetén is azonos teherbírásúnak feltételezhette.

A betonkísérletekhez az adalékanyag-vizsgálatok során kiválasztott 18 fajta habkavics és 2 fajta duzzasztott agyagkavics könnyű adalékanyagot és természetes kvarckavicsot használt. Az *adalékanyag szilárdságának és mennyiségének a könnyűbeton szilárdságára gyakorolt hatását* vizsgálva szabványos 150 mm élhosszúságú kockákat (nyomószilárdság-vizsgálat) és 70,7 × 70,7 × 250 mm-es hasábokat (hajlító-húzó vizsgálat, tönkremeneteli mód) készített. Minden esetben az 1. jelű habarcsösszetételt (*24.9. táblázat*) alkalmazta, a könnyű adalékanyag-tartalmat 36–56 V% között változtatta. A vizsgálatokat az EN 206-1/MSZ 4798-1 szabvány, illetve előszabványai szerint végezte.

A *habarcs szilárdságának hatását* 47 V%-os könnyű adalékanyag-tartalmú, három különböző összetételű habarcs (*24.10. táblázat*) esetén vizsgálta, a három összetétel esetén a víztartalom azonos volt. A kísérletek ezen szakaszában 70,7 mm

24.9. táblázat. A három alkalmazott habarcsösszetétel főbb jellemzői

Összetétel	Homok/cement tömegaránya	Víz-cement tényező	Cementtartalom a habarcsban (kg/m³)	Cementtartalom a betonban (47 V% adalékanyag-adagolás esetén) (kg/m³)
1. jelű	1,25	0,35	868	460
2. jelű	2,0	0,43	638	338
3. jelű	3,0	0,55	494	262

oldalhosszúságú kocka (nyomószilárdság) és 40 × 40 × 160 mm-es hasáb (tönkremeneteli mód) próbatesteket készített. Ezeken a próbatesteken mért szilárdságokkal értékelhető a habarcs saját szilárdságváltozásának hatása, de nem becsülhető belőle közvetlenül a beton szilárdsági osztálya.

A *rugalmassági modulust* 120 × 120 × 360 mm-es álló hasábokon vizsgálta a becsült törőerő 1/3-áig terhelve, a terhelést-tehermentesítést háromszor ismételve. A *zsugorodás* meghatározásához 40 × 40 × 400 mm-es hasábokat készített; ezeket 1 napos korig sablonban, fóliázva tárolta, és mérte Leitz–Wetzlar mikroszkóppal (képlékeny zsugorodás), majd utókezelés nélkül Huggenberger-féle deformétterrel vizsgálta 20 mm-es alaphosszon (száradási zsugorodás). A *hőtágulási együtthatót* a zsugorodáshoz használt próbatesteken mérte legalább fél éves korban –20 és +95 °C közötti hőmérséklettartományban.

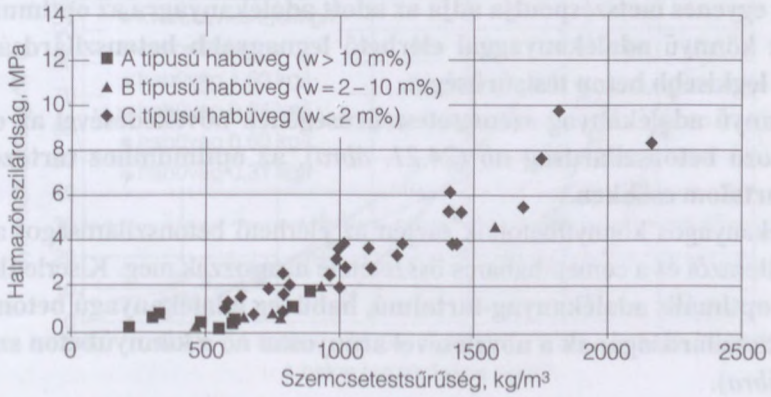
24.6.2.3. Az értekezés új tudományos eredményei

A vastagon szedett szövegrészek ismertetik az új megállapításokat.

1. téziscsoport: *A habüveg adalékanyagok önszilárdsága.*

A habüveg adalékanyagok halmazönszilárdsága a szemcsetestsűrűség növekedésével nő. **A szerkezeti beton készítéséhez alkalmas, 500 kg/m³-nél nagyobb szemcsetestsűrűségű habüveg adalékanyagok esetén a halmazönszilárdság és a szemcsetestsűrűség összefüggése gyakorlatilag lineárisnak tekinthető** (*24.18. ábra*). Az így felvett egyenesre a kvarckavics is megközelítőleg illeszkedik, így ennek százalékában adható meg a habüveg szilárdsága. Az egyenesre a duzzasztott agyagkavicson mért értékek szintén jól illeszkednek.

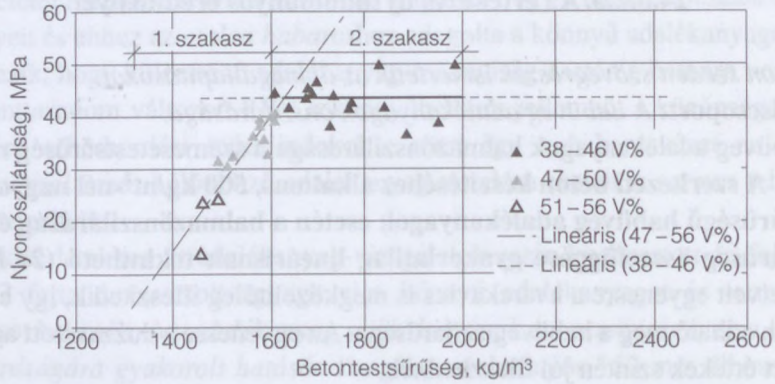
Kísérletileg igazolta, hogy a **habüveg adalékanyagok szemcsetestsűrűség és halmazönszilárdság összefüggése független az adalékanyag vízfelvevő képességétől** (*24.19. ábra*).



24.19. ábra. Különböző típusú habüvegek halmazönszilárdsága a szemcsetestsűrűsége függvényében [*Nemes* (2006)]

2. téziscsoport: *A habüveg adalékanyagú könnyűbetonok szilárdsága*

Ismeretes, hogy ha a betonban a könnyű adalékanyag mennyiségét (térfogatát) csökkentjük, az a testsűrűség és a szilárdság együttes növekedését eredményezi, mert a nagyobb testsűrűségű teherviselő habarcsváz aránya nő. Ez az összefüggés viszont nem érvényes az adott könnyű adalékanyaggal elérhető beton teljes testsűrűségi tartományában. Kísérletileg igazolta, hogy ha **azonos összetételű cementhabarcs alkalmazásakor a habüveg mennyiségét a lehetséges legnagyobb adagolásról fokozatosan csökkentjük, akkor kezdetben a könnyűbeton nyomószilárdsága a testsűrűség növekedésével lineárisan nő** (*24.20 ábra 1. szakasz*). **Ha a könnyű adalékanyag mennyiségének csökkentése elér egy kísérletileg meghatározható, az adalékanyag szilárdságára jellemző értéket, akkor az adalékanyag mennyiségének további csökkentése reális határon belül (a legnagyobb adagolás feléig) csupán a beton testsűrűség növekedését okozza, gyakorlatilag változatlan nyomószilárdság esetén** (*24.20. ábra 2. szakasz*).



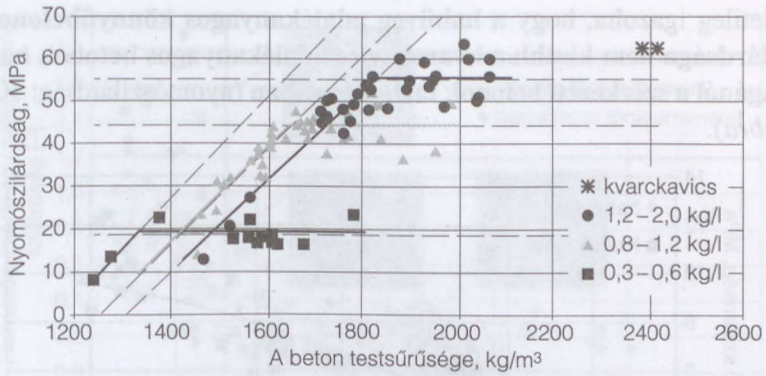
24.20. ábra. A beton nyomószilárdsága a beton testsűrűsége függvényében [*Nemes* (2006)]

A két egyenes metszéspontja adja az adott adalékanyagra az optimumot, azaz az adott könnyű adalékanyaggal elérhető legnagyobb betonszilárdság mellett elérhető legkisebb beton testsűrűséget.

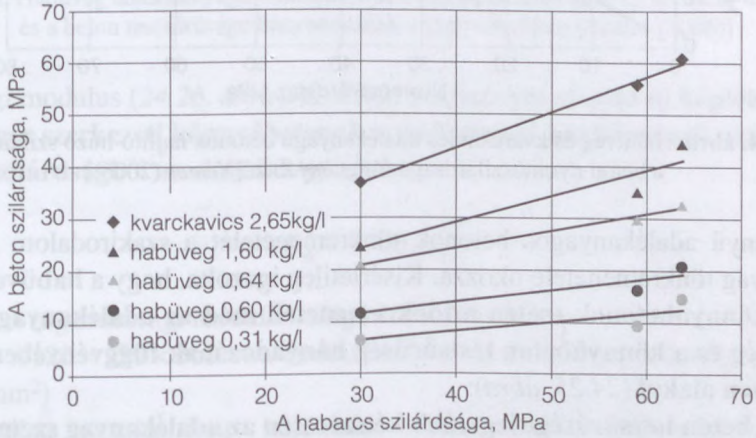
A könnyű adalékanyag szemcsetestsűrűségének növekedésével az optimumhoz tartozó betonszilárdság nő (*24.21. ábra*), **az optimumhoz tartozó adalékanyag-tartalom csökken.**

Adalékanyagos könnyűbetonok esetén az elérhető betonszilárdságot az adalékanyag jellemzői és a cementhabarcs összetétele határozzák meg. Kísérletileg igazolta, hogy **optimális adalékanyag-tartalmú, habüveg adalékanyagú betonok esetén a habarcs szilárdságának a növelésével arányosan nő a könnyűbeton szilárdsága** (*24.22. ábra*).

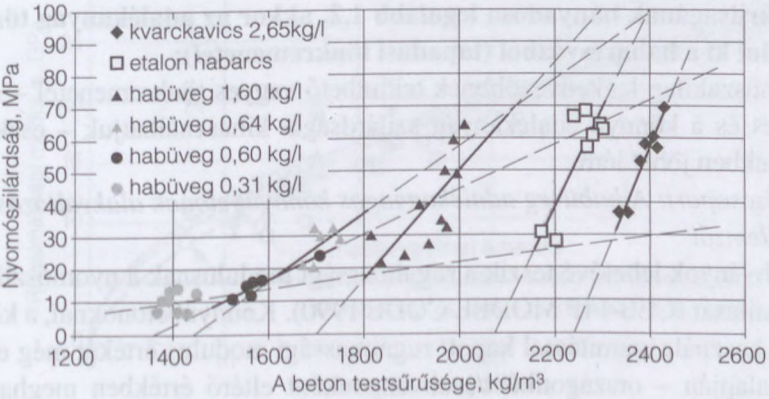
Ez megegyezik a kvarckavics adalékanyagú beton viselkedésével, de különböző testsűrűségű habüvegek esetén más-más szilárdsági tartomány érhető el (*24.23. ábra*).



24.21. ábra. A beton nyomószilárdsága a beton testűrűsége függvényében [*Nemes* (2006)]

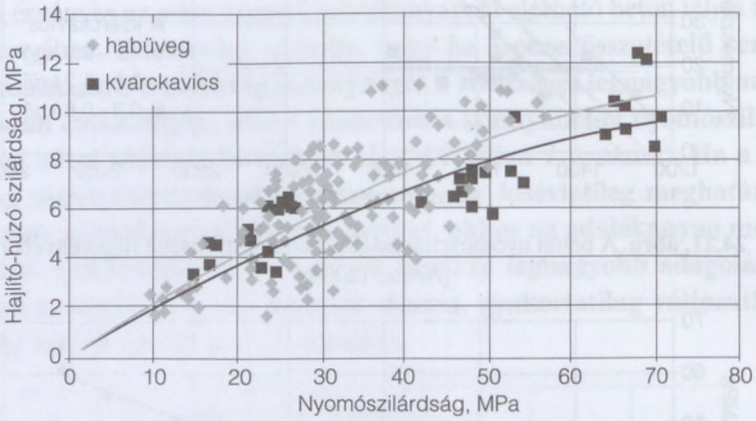


24.22. ábra. Különböző habüveg adalékanyagú betonok szilárdsága a habarcs szilárdsága függvényében [*Nemes* (2006)]



24.23. ábra. Különböző habüveg adalékanyagú betonok nyomószilárdsága a beton testsűrűsége függvényében [*Nemes* (2006)]

Kísérletileg igazolta, hogy a **habüveg adalékanyagos könnyűbetonok hajlító-húzó szilárdsága nem kisebb a kvarckavics adalékanyagos betonok hajlító-húzó szilárdságánál a szerkezeti betonok tartományában** (nyomószilárdság: 10–60 MPa) (*24.24. ábra*).



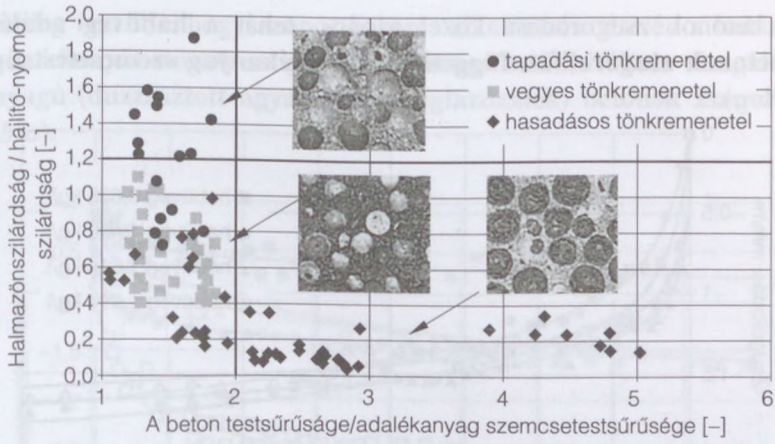
24.24. ábra. Habüveg és kvarckavics adalékanyagú betonok hajlító-húzó szilárdsága a beton nyomószilárdsága függvényében [*Nemes* (2006)]

A könnyű adalékanyagos betonok tönkremenetelét a szakirodalom szerint az adalékanyag tönkremenetele okozza. Kísérletileg igazolta, hogy a **habüveg adalékanyagú könnyűbetonok esetén a tönkremeneteli mód az adalékanyag szemcsetestsűrűség és a könnyűbeton testsűrűség hányadosának függvényében a következőképpen alakul** (*24.25. ábra*):

- **ha a beton testsűrűsége legalább kétszeresen az adalékanyag szemcsetestsűrűségének, akkor a hajlítási törés az adalékanyag tönkremenetelével (hasadásával) következik be;**
- **ha az adalékanyag halmazönszilárdságának és a könnyűbeton hajlító-húzó szilárdságának hányadosa legalább 1,2, akkor az adalékanyag törés nélkül fordul ki a habarcsvázból (tapadási tönkremenetel);**
- A műszakilag legkedvezőbbnek tekinthető vegyes tönkremenetel – ahol a habarcs és a könnyű adalékanyag szilárdságát kihasználhatjuk – csak a köztes esetekben jöhet létre.

3. téziscsoport: A habüveg adalékanyagos könnyűbetonok alakváltozással összefüggő jellemzői

A szabványok lehetővé teszik a rugalmassági modulusnak a nyomószilárdságból való számítását (CEB-FIP MODEL CODE 1990). Könnyűbetonoknál, a közönséges betonnál használt számítással kapott rugalmassági modulus értékét még egy, a testsűrűség alapján – országonként/szabványonként eltérő értékben meghatározott – csökkentő tényezővel kell beszorozni. A könnyűbetonok nyomószilárdsága jelentős mértékben függ a beton testsűrűségétől, ezért ebből közvetlenül is becsülhető a ru-



24.25. ábra. Habüveg adalékanyagú tönkremeneteli módja az adalékanyag szemcse-testsűrűsége és a beton testsűrűsége hányadosának a függvényében [*Nemes* (2006)]

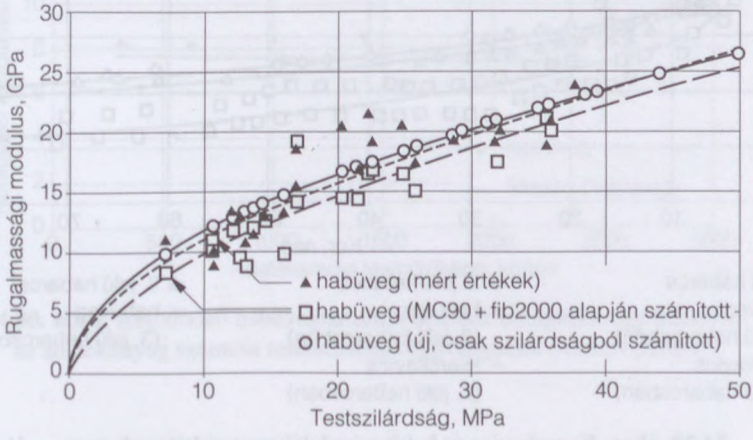
galmassági modulus (*24.26. ábra*). Kísérleti eredményei alapján **új képletet javasol a habüveges szerkezeti könnyűbetonok rugalmassági modulusának számítására a nyomószilárdságból az alábbiak szerint:**

$$E_m = 3700\sqrt{f_{cm}}$$

ahol: E_m = a rugalmassági modulus átlagértéke (N/mm^2),

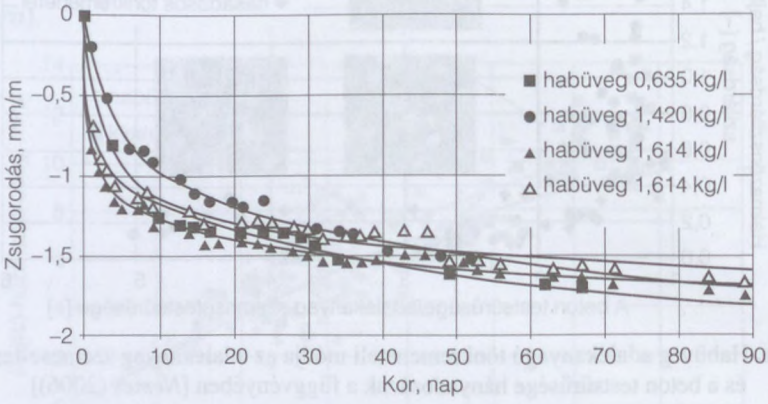
f_{cm} = a 120 × 120 × 360 mm-es álló hasábon mért nyomószilárdság átlagértéke (N/mm^2)

Kísérletileg igazolta, hogy különböző szemcsetestsűrűségű habüveg adalékanyagokkal készített azonos habarcs-összetételű és azonos könnyű adalékanyag



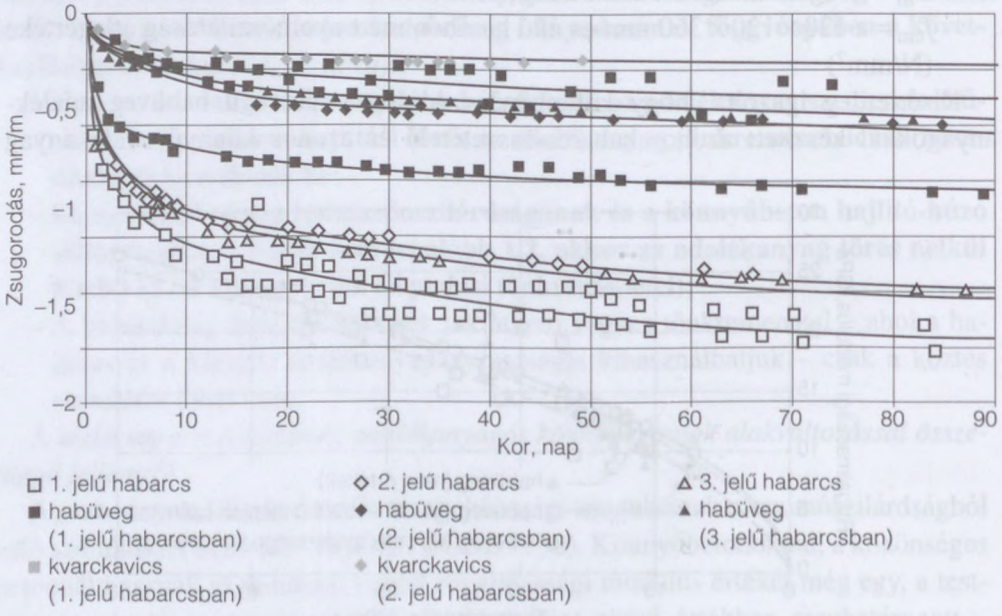
24.26. ábra. Különböző habüveg adalékanyagok rugalmassági modulusa a testűrűség függvényében [*Nemes* (2006)]

tartalmú betonok zsugorodása közel azonos, tehát a **habüveg adalékanyagú könnyűbetonok zsugorodása független az adalékanyag szemcsetestsűrűségétől** (*24.27. ábra*).



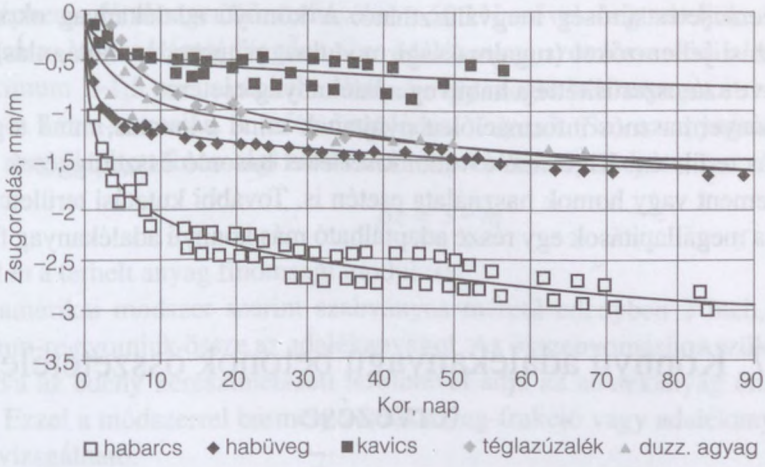
24.27. ábra. Különböző habüveg adalékanyagú betonok zsugorodása a kor függvényében [*Nemes* (2006)]

Kísérletileg igazolta, hogy a **habüveg adalékanyagos könnyűbetonok zsugorodása** – hasonlóan a közönséges betonokhoz – **elsősorban a habarcs összetételétől függ, de a zsugorodás végértéke azonos habarcs esetén mintegy kétszerese a kvarckavics adalékanyagú betonénak** (*24.28. ábra*).



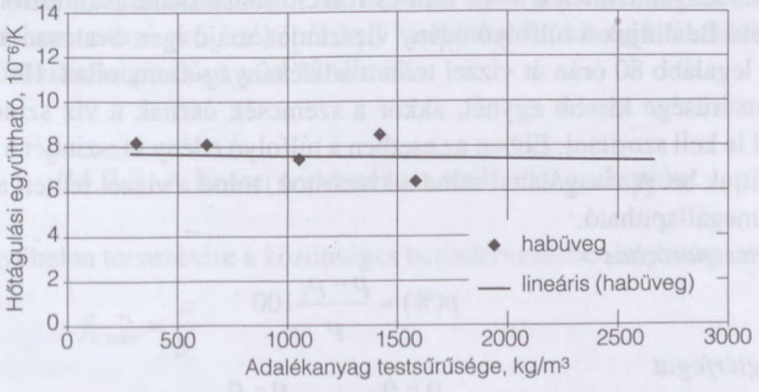
24.28. ábra. Kvarckavics és habüveg adalékanyagú betonok zsugorodása a kor függvényében [*Nemes* (2006)]

Kísérletileg igazolta, hogy azonos habarcs alkalmazása esetén a **habüveg adalékanyagos könnyűbetonok zsugorodása azonos a többi általa vizsgált könnyű adalékanyagú (duzzasztott agyagkavics, téglazúzalék) betonok zsugorodásával** (*24.29. ábra*).



24.29. ábra. Különféle adalékanyagú betonok zsugorodása a kor függvényében [*Nemes* (2006)]

Kísérletileg igazolta, hogy **habüveg adalékanyag használata esetén a könnyűbeton lineáris hőtágulási együtthatója független az adalékanyag szemcsetestsűrűségétől** (*24.30. ábra*).



24.30. ábra. Különböző habüvegtartalmú betonok hőtágulási együtthatója az adalékanyag szemcse testsűrűsége függvényében [*Nemes* (2006)]

24.6.2.4. Az értekezés eredményeinek hasznosítási lehetőségei

Kísérleti eredményei alapján az adott habüveg adalékanyaggal készített könnyűbetonok optimális adalékanyag-tartalma és a könnyű adalékanyag-habarcsváz szilárdságaránya meghatározható, illetve adott betonszilárdság–testsűrűség igényhez az ideális szemcsetestsűrűség megválasztható. A könnyű adalékanyag okozta eltérő alakváltozási jellemzőket (rugalmassági modulus, zsugorodás, hőtágulás) pontosította, illetve számszerűsítette a habüveg adalékanyag esetére.

Eredményei hasznos információkat nyújtanak mind a kutatás, mind a gyakorlati alkalmazás területén. Kisszámú további kísérlettel hasonló összefüggések állíthatók fel más cement vagy homok használata esetén is. További kutatási területek jelölhetők ki, és a megállapítások egy része adaptálható más könnyű adalékanyag fajtákra is.

24.7. Könnyű adalékanyagú betonok összetételének tervezése

24.7.1. A könnyű adalékanyag legfontosabb tulajdonságai

A porózus könnyű adalékanyagok legfontosabb jellemzői: halmazsűrűség, porozitás, önszilárdság és a vízfelvétel.

A *halmazsűrűséget* 10 l-es edényben, a 7–15 mm-es adalékanyag-frakció felhasználásával mérjük.

A *testsűrűséget* szintén a 7–15 mm-es frakció felhasználásával, túlfolyó edényben mérjük. Beállítjuk a túlfolyó edény vízszintjét, majd igen óvatosan az edénybe szórjuk a legalább 80 órán át vízzel telített adalékanyag-szemcséket. Ha az adalékanyag testsűrűsége kisebb egynél, akkor a szemcsék úsznak a víz színén, azokat fémlappal le kell szorítani. Ebben az esetben a túlfolyó edény vízszintjét a fémlappal együtt állítjuk be. A vizsgálattal mind a kiszárított, mind a vízzel telített anyag testsűrűsége megállapítható.

A *szemcseporozitás*

$$p(\%) = \frac{\rho - \rho_t}{\rho} 100$$

a *hézagtérfogat*

$$H(\%) = \frac{\rho - \rho_H}{\rho} 100 - \frac{\rho - \rho_t}{\rho} 100$$

képletből számítható, ahol

ρ a sűrűség

ρ_t testsűrűség, és

ρ_H a halmazsűrűség

Az *adalékanyag szilárdságának* a mérésére két elfogadottabb módszer ismeretes.

a) A *Hummel-féle szétmorzsolódási tényezőt* következőképpen vizsgáljuk: Az adalékanyagból kb. 50–50% 7–10 és 10–15 mm-es szemcsét leválasztunk, megmérjük a halmazsűrűségét, majd tömegméréssel kimérünk 0,5 liter mennyiséget. Ezt egyenletesen elterítjük 15 cm átmérőjű henger alján. Az anyagvizsgáló gépben – fémhenger közvetítésével – 50 kN erővel megterheljük. A terhelés hatására – szilárdságtól függően – az adalékanyag szétmorzsolódik. A terhelést maximum 1–1,5 perc alatt kell elérni. Az így megterhelt anyagot átrostáljuk az 1, 3 és 7 mm-es rostán. A szétmorzsolódási tényezőt (Sz), az anyagnak e rostákon megállapított finomsági modulusának a különbsége adja:

$$Sz = 3 - m$$

ahol m a terhelt anyag finomsági modulusa.

b) Az amerikai módszer szerint szabványos méretű edényben 2 inch, azaz kb. 50 mm-re nyomjuk össze az adalékanyagot. Az összenyomáshoz szükséges erő osztva az edény keresztmetszeti területével adja az adalékanyag önszilárdságát. Ezzel a módszerrel bármely adalékanyag-frakció vagy adalékanyag-keverék vizsgálható.

c) Az *önszilárdság vizsgálatát ma* a könnyű adalékanyagokra vonatkozó MSZ EN 130551 szerint végezzük. A vizsgálat hasonlít az amerikai módszerhez, itt se az aprózódást mérjük, mint a Hummel-féle vizsgálatnál. Lényege, hogy 1 literes szabványos méretű mozsárba helyezett ismert mennyiségű betömörített könnyű adalékanyagot egy dugattyú segítségével folyamatos erőmérés mellett összenyomunk. Mivel az aprózódó szemcsék egyre tömörebbek lesznek, ezért nem tudunk valós szilárdságot mérni, tehát szabvány szerint a 10% összenyomódáshoz tartozó erő értékéből kell kiszámítani a könnyű adalékanyag halmazönszilárdságát (lásd a *24.18. ábrát*).

24.7.2. A beton tervezése a szilárdság alapján

A könnyűbeton tervezésére a közönséges betontervezésben szokványos

Graf: $f_{c,cube} = \dfrac{a}{b_r}$

Bolomey: $f_{c,cube} = a\left(\dfrac{1}{r} - b\right)$

Abrams: $f_{c,cube} = \dfrac{a}{b^r}$

képletek használhatók, csak a víz-cement tényező helyett *Palotás* által bevezetett víz-levegő-cement tényezőt kell érteni és a kísérleti állandókat (a és b) képletenként és adalékfajtánként meg kell állapítani. *Ujhelyi* Graf képlete állandóit a *24.10. táblázat* alapján javasolja felvenni. A víz-levegő-cement tényező

$$r = \frac{m_w + m_\ell}{m_c}$$

tehát az 1 m^3 betonban foglalt víz és levegő (liter) cement tömegéhez (kg/m^3) viszonyított értéke.

A képletből első lépésben az r értékét határozzuk meg:

$$\log r = \frac{1}{b} \log \frac{a}{f_{c,\,cube}}$$

Az abszolút térfogatok alapján felírható:

$$1000 = \left(\frac{1}{\rho_c} + r \right) m_c + \frac{1}{\rho_a} m_a$$

ahol ρ_c a cement, ρ_a az adalékanyag sűrűsége

m_c a cement, m_a az adalékanyag m^3-kénti mennyisége.

A cement sűrűsége 500-as cement esetén 3,0 g/cm^3-re, 600-as cement esetén 3,10 g/cm^3-re vehető. Az adalékanyag sűrűségét a *24.9. táblázatból* vehetjük. Az egyenlet kétismeretlenes, m_c és m_a közül az egyiket felvesszük, a másik számítható. Az adaléktömeg kiszárított anyagra vonatkozik. A vízszükségletet a cement vízigénye, a konzisztenciaképzéshez szükséges vízmennyiség és az adalékanyag vízfelszívása határozza meg. A vízszükséglet képlékeny konzisztencia esetén

$$m_w = 0{,}2m_c + cm_a$$

földnedves konzisztencia esetén

$$m_w = 0{,}2m_c + 0{,}9cm_a$$

képletből számítható. A képletben szereplő c a keverés és bedolgozás között eltelt időtől függően megállapított vízfelvételt jelenti. 1 órás bedolgozásra *24.11. táblázat* adatai mértékadók. A képletben szereplő L levegőtartalom egyrészt a teljes (10 napos) vízfelvétel és a számításba vett egyórás vízfelvétel között különbségből, másrészt alig földnedves beton esetén a szemcsék között, vízzel nem kitöltött légpórusokból adódik. Ezt csak ellenőrzésül használjuk.

Pl. előírt B 200-as betonszilárdság, földnedves betonkonzisztencia, amelyet a keverés után 1 órával dolgozunk be, C 500-as cement, kazánsalak:

$$\lg r = \frac{1}{1{,}8} \log \frac{290}{200} = 0{,}09$$

24.10. táblázat. A könnyűadalékos betonok szilárdságának az előrebecslése a víz-levegő-cement tényező segítségével

A beton megnevezése	Kísérleti állandók		Érvényességi határok	
	a	b	szilárdság	víz-levegő-cement tényező
Keramzitbeton keramzithomokkal	410	1,8	10–150	2,00–7,0
Keramzitbeton folyami homokkal	290	1,8	10–200	1,30–4,0
Habsalakbeton	170	1,6	50–500	0,50–3,0
Tufabeton	170	1,7	10–350	0,65–4,5
Kazánsalakbeton, nagyobb szilárdságú	290	1,0	240–550	0,60–1,0
Kazánsalakbeton, kisebb szilárdságú	290	1,8	40–240	1,00–3,0
Téglazúzalékos beton, tűvibrátorral tömörítve	310	0,7	240–450	0,65–1,5
Téglazúzalékos beton, döngöléssel tömörítve	250	0,8	150–400	0,65–2,0
Pernyekavicsbeton, tűvibrátorral tömörítve	280	0,6	240–450	0,55–1,5
Pernyekavicsbeton, döngöléssel tömörítve	210	1,0	140–300	0,65–1,7

A *24.9. táblázat* szerint $\rho_a = 2{,}46$ kg/lit, továbbá $\rho_c = 3{,}00$ kg/lit:

$$m_a = \left[1000 - \left(\frac{1}{\rho_c} + r\right) m_c\right] \rho_a = \left[1000 - \left(\frac{1}{3} + 1{,}23\right) 300\right] 2{,}46 =$$

$$m_w = 0{,}2 m_c + 0{,}9 \cdot 0{,}25 m_a$$

24.11. táblázat. Néhány könnyű-adalékanyag jellemző tulajdonsága

	Tufa	Duzzasztott agyagkavics	Duzzasztott perlit	Zúzott tégla	Duzzasztott üvegkavics
Sűrűség, kg/m³	2500–2800	2500–2600			2050–2450
Testsűrűség, kg/m³	1200–2500	650–1600		1950–2150	300–1450
Halmazsűrűség, kg/m³		300–800	50–180	980–1250	180–900
Porozitás, térfogat%	15–20	45–75			35–85
Vízfelvétel, tömeg%	2–25	20–50		15–25	1–60
Nyomószilárdság, önszilárdság	6–80 N/mm² (Nyomószilárdság szabályos alakú próbatesten mérve)	1,5–10,5 N/mm² (20 mm-es összenyomódáshoz tartozó önszilárdság)		1,2–2,8 (Hummel-féle szétmorzsolódási tényező)	0,5–13,0 N/mm² (20 mm-es összenyomódáshoz tartozó önszilárdság)
Könnyűbeton testsűrűsége, kg/m³	1300–2250	800–1800	200–750	1800–1900	600–1800
Könnyűbeton nyomószilárdsága, N/mm²	5–40	8–45	0,2–3,5	12–25	2–45

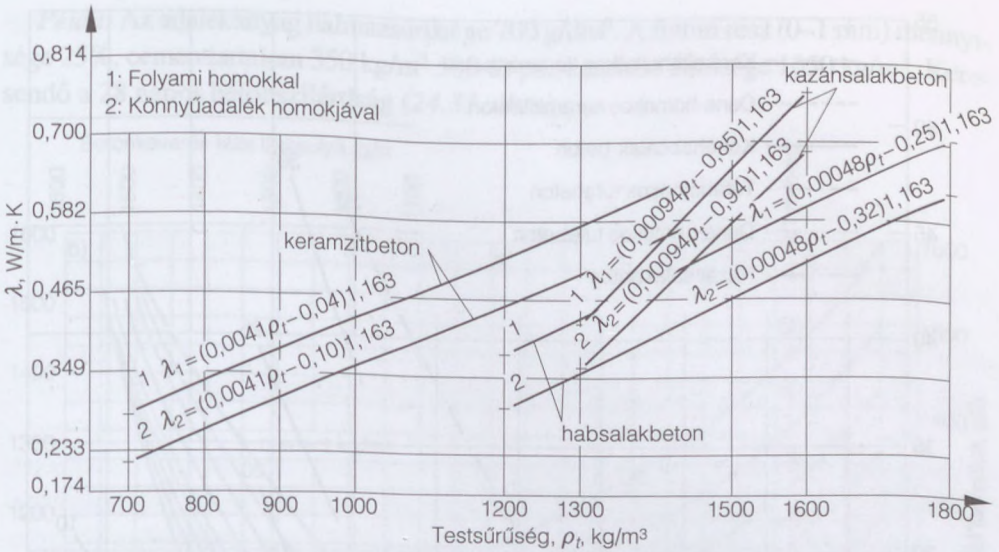
A betonösszetétel különböző cementtartalmak esetén:

500-as pc	kg/m^3	300	350	400
kazánsalak,	kg/m^3	1310	1115	925
vízszükséglet,	kg/m^3	355	320	289
Levegőtartalom, $L = r \cdot C - V$ képletből	lit.	14	110	203

Nemes R. habüveg adalékanyagú könnyűbetonokra (lásd. 24.6.2.fejezet) vonatkozó kutatásai során rámutatott arra is, hogy teherhordó könnyűbetonok összetételének tervezése eltér a hagyományos betonokétól, mert itt nem csak a szilárdság, hanem a testsűrűség is követelmény, és sok esetben nem csak az adalékanyagváz a fő szilárdsághordozó. A hagyományos kvarckavics vagy zúzottkő adalékanyagos betonoknál a kiindulási adat a tervezés számára a nyomószilárdság, addig a könnyű adalékanyagos betonoknál ugyan ilyen fontos alapkövetelmény a testsűrűség is. A két feltétel (szilárdságra és testsűrűségre vonatkozó) ellentétes irányú és párhuzamosan teljesítendő. A hagyományos betonoknál a szilárdság tervezése a víz-cement tényező (v/c) megválasztásán alapul (lásd pl. *Palotás–Bolomey* módszer). A víz-cement tényező csökkenésével a nyomószilárdság nő, és az egyéb pl. tartóssági tulajdonságok is egyre kedvezőbben alakulnak. Ezért általános nézet, hogy a beton szilárdsága a víz-cement tényezőtől függ. Pedig alapvetően az adalékanyag és a helyes adalékanyag-váz, ami a beton szilárdságát adja. Ezt lehet „elrontani" egy rossz cementpéppel (cementkővázzal). A tervezési módszer ezt is figyelembe veszi, a megfelelő alakú és finomsági modulusú adalékanyag megválasztásával, megtervezésével, illetve ellenőrzésével. Az adalékanyag szilárdságát ezek a módszerek állandónak tekintik, amik a folyami kvarc kavicsok és homokok esetén, illetve a zúzottkövek nagy részénél igazak is. A könnyű adalékanyagok alkalmazásakor viszont más a helyzet, ott alapvetően az adalékanyag szilárdsága határozza meg az elérhető maximális szilárdságot. A hagyományos tömegszázalékos szemmegoszlási görbék nem alkalmazhatók, térfogatszázalékban kell megadni az adalékanyag mennyiségét. Általánosan elmondható, hogy a könnyű adalékanyag mennyiségének csökkentésével azonos habarcsösszetétel mellett nő a testsűrűség, de nő a nyomószilárdság is. Viszont ez csak egy – az adott adalékanyagra jellemző – határig igaz. Ez alatt már hiába csökkentjük a könnyű adalékanyag mennyiségét, csak a testsűrűség nő, a nyomószilárdság nem. Ennek a kétféle viselkedésnek a határán optimális mind az adalékanyag, mind a habarcs kihasználtsága, erre érdemes törekedni (lásd *24.20. és 24.21. ábra*).

24.7.3. Hőszigetelő és teherhordó könnyűbetonok összetételének tervezése

A hőszigetelő képességet, illetve a λ hővezetési tényezőt azáltal vehetjük figyelembe, hogy egy adalékanyag felhasználása esetén a hővezető képesség egyenesen arányos a beton testsűrűségével (kiszárított állapotban, *24.31. ábra*). A friss beton ter-



24.31 ábra. A beton hővezetési tényezője és a kiszárított beton testsűrűsége közötti összefüggés

vezése során tehát adottnak kell venni a testsűrűséget és a rendelkezésre álló tömörítő eszköz ismeretében kell a betonösszetételt megállapítani.

Ujhelyi kohóhabsalakos betonokra nomogramos (*24.33. ábra*) tervezési módot dolgozott ki. A víz-cement tényezőnek nincs meghatározó szerepe. A beton testsűrűsége és a szilárdsága közötti összefüggést a tömörítés mértéke és a cementtartalom határozza meg (*24.32. ábra*) és ezek szorzatát bedolgozási modulusnak nevezzük és *B*-vel jelöljük:

$$B = T \cdot m_c$$

ahol

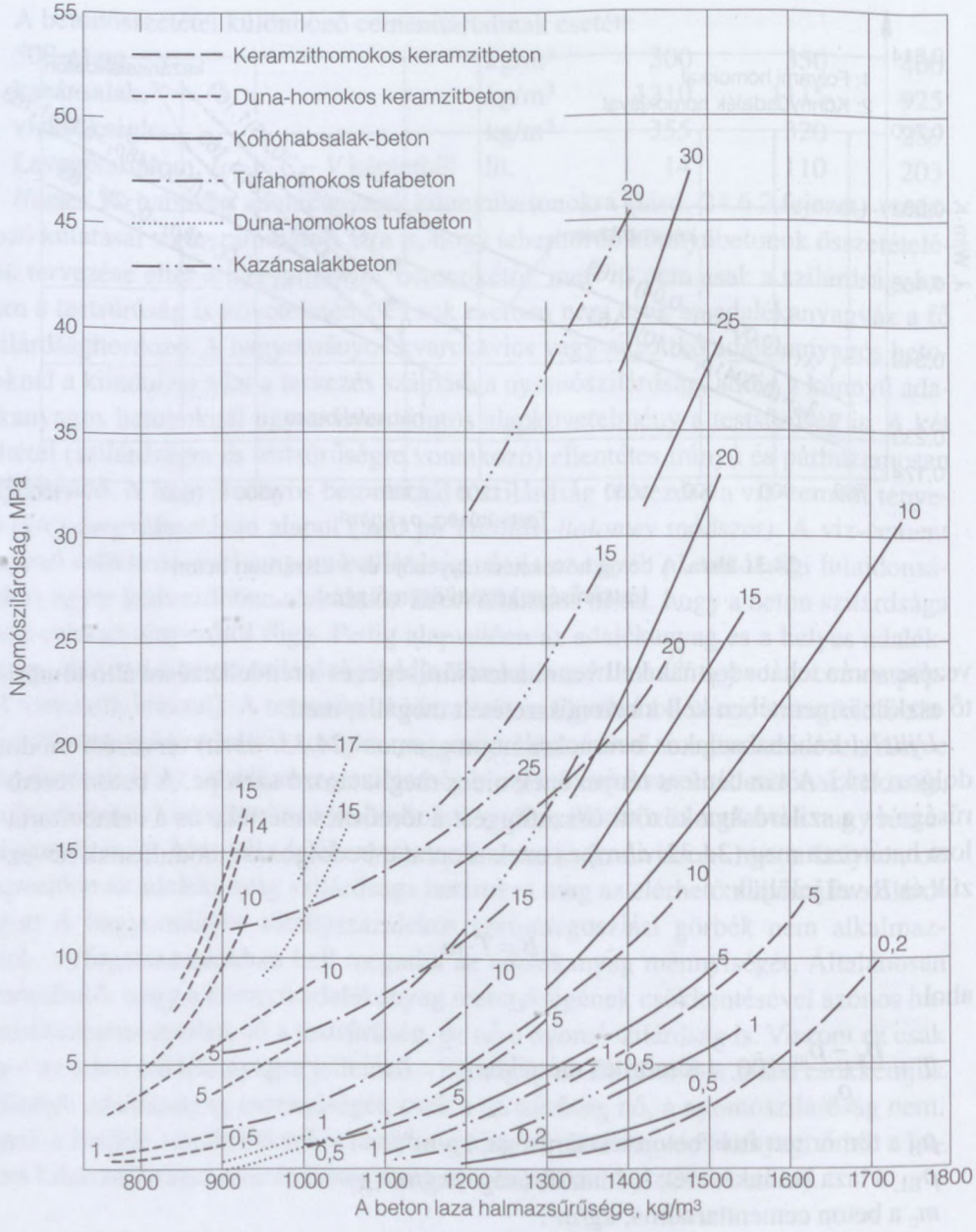
$T = \dfrac{\rho_B - \rho_{BL}}{\rho_{BL}} 100$, a tömörítés mértéke,

ρ_B a tömörített friss beton testsűrűsége, kg/m^3,

ρ_{BL} a laza betonkeverék halmazsűrűsége, kg/m^3,

m_c a beton cementtartalma, kg/m^3.

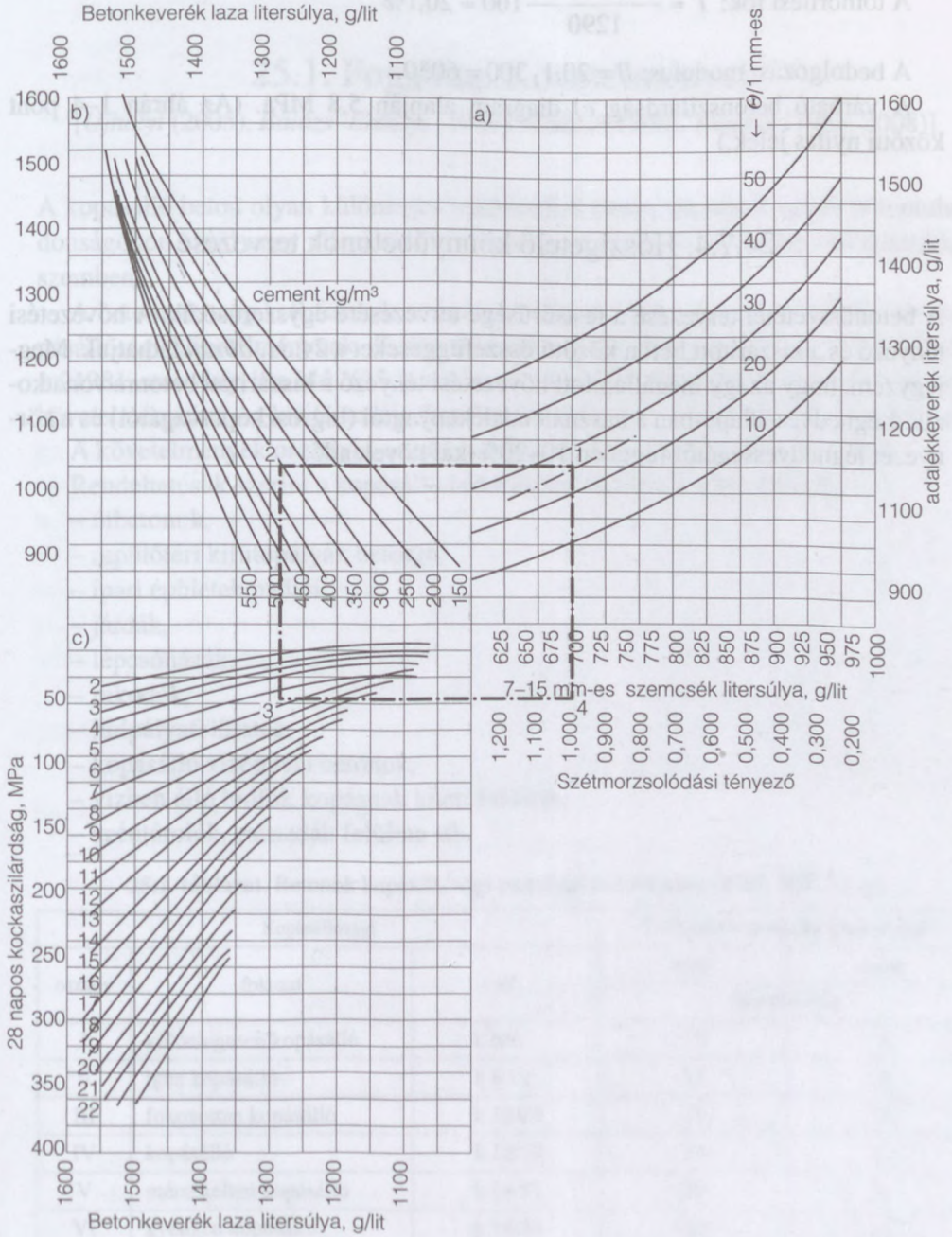
A *24.33.* nomogram *a)* diagramjából az adalékanyag szabványos halmazsűrűségének (7–15 mm-es szemcséken mérve), vagy a szétmorzsolódási tényezőjének, illetve a 0–1 mm-es részek mennyiségének az ismeretében meghatározható az adalékkeverék litersúlya. A *b)* diagramból a meghatározott litersúly és cementtartalom (ezt felvesszük) ismeretében a betonkeverék halmazsűrűsége, a *c)* diagramból pedig ennek, valamint a megadott friss tömör beton ismeretében számított bedolgozási modulus függvényében a beton 28 napos kockaszilárdsága.



24.32. ábra. Adalékanyagos könnyűbetonok testsűrűsége és bedolgozási modulusa közötti összefüggés

A betonkeverékhez 500-as vagy 600-as cementet kell használni. A betont kényszerkeverőgéppel kell keverni és gondosan nedvesen utókezelni.

Példa: Az adalékanyag halmazsűrűsége 700 g/dm^3. A finom rész (0–1 mm) mennyisége 25%, cementtartalom 350 kg/m^3 500-as pc., készítési sűrűsége 1050 kg/m^3. Keresendő a 28 napos betonszilárdság (*24.33. ábra*).



24.33. ábra. Nomogramok kohósalakbeton tervezésére

Az *a)* diagram szerint a laza adalékanyag halmasűrűsége 1040 kg/m^3, a *b)* diagramból a laza betonkeverék sűrűsége 1290 kg/m^3.

A tömörítési fok: $T = \frac{1550 - 1290}{1290} 100 = 20{,}1\%$

A bedolgozási modulus: $B = 20{,}1 \cdot 300 = 6030$.

A várható betonszilárdság *c)* diagram alapján 5,8 MPa. (Az ábrán 1–4 pont közötti nyilas jelek.)

24.7.4. Hőszigetelő könnyűbetonok tervezése

A betonösszetétel tervezése a testsűrűsége tervezésére egyszerűsödik. A hővezetési tényező és a kiszárított beton közötti összefüggéseket a *24.31. ábrán* láthatjuk. Megjegyzem, hogy az így megállapított hővezetési tényező a kiszárított betonra vonatkozik. Légnedves állapotban a használt adalékanyagtól (higroszkóposságától) és a környezet légnedvességétől függően 10–20%-kal növelendő.

25. Kopásálló beton

25.1. Fogalma. Követelmények

[*Ujhelyi* (2005), *Balázs–Erdélyi* (1968), *Balázs* (1968), *Kausay* (1983, 2008)]

A kopásálló beton olyan különleges rendeltetésű beton, amelytől egyéb betontulajdonságokon kívül nagy ellenállást kívánunk meg koptató- és esetleg ütőhatásokkal szemben.

A betonnak meg kell felelnie az igénybevételek alapján a tervező által előírt kopásállósági követelménynek. E követelményt 2003. december 31-ig MSZ 18290-1:21981 szabvány írta elő. (*25.1. táblázat*). Az MSZ 4798:2004 szabvány szerinti követelményeket – a kitéti osztály figyelembevételével – a *25.2. táblázat* szemlélteti.

A követelmények osztályba sorolása a Böhme kopási vizsgálaton alapszik.

Rendeltetésük szerint a kopásálló betonokhoz tartoznak a következők:

- útbetonok,
- repülőtéri kifutópályák betonja,
- ipari épületek padlói,
- járdák,
- lépcsőházak,
- rakodók,
- hídpályafelületek,
- kopásálló vízépítési betonok,
- vízben álló hídfők kopásnak kitett felülete,
- széntárolók, csúszdák felülete stb.

25.1. táblázat. Betonok kopásállósági osztályai és fokozatai (2003. XII. 31-ig)

Kopásállósági			Térfogatveszteség, legfeljebb*, cm^3	
			vizes	száraz
osztály	fokozat	jel	koptatás után	
I	különlegesen kopásálló	k 6/9	9	6
II	igen kopásálló	k 8/12	12	8
III	fokozottan kopásálló	k 10/15	15	10
IV	kopásálló	k 12/18	18	12
V	mérsékelten kopásálló	k 14/21	21	14
VI	gyengén kopásálló	k 16/24	24	16

* a száraz és a vizes koptatás mértékadó értékei közül konkrét esetben a tényleges igénybevétel körülményeinek megfelelőt, általános esetben a kedvezőtlenebbet kell meghatározónak tekinteni

25.2. táblázat. Követelmények az MSZ 4798:2004 szerinti kopásállósági osztályokra

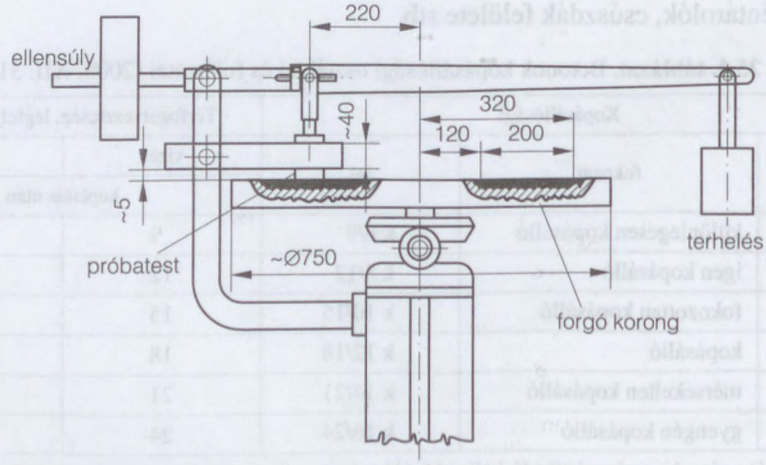
A kopási térfogatveszteség megengedett mértéke, mm^3		
osztály	száraz koptatás	vizes koptatás
XK1(H) osztály esetén	14 000	21 000
XK2(H) osztály esetén	12 000	18 000
XK3(H) osztály esetén	10 000	16 000
XK4(H) osztály esetén	8 000	14 000

25.2. A beton kopásállóságának a vizsgálata

25.2.1. Böhme-rendszerű koptatóberendezés

A leggyakrabban használt a *Böhme-rendszerű koptatóberendezés* (*25.1. ábra*), amely lényegében egy kb. 750 mm átmérőjű, vízszintesen csapágyazott sík, egyenletes kopást biztosító kényszerkoptató berendezés (MSZ 1991:1967). A vizsgálathoz a betonból 50 cm^2 felületű kockát kell kifűrészelni. Koptatás közben a próbatest 30 kp nyomóerőt kap. A koptatáshoz 60–70% korundtartalmú, 0,15–0,2 mm szemnagyságú csiszolóport használunk. A korong a próbatest alatt 440 fordulatot tesz. (1978 óta a körülfordulás száma 352.) A próbakockát 110 fordulatonként függőleges tengelye körül egyirányban elforgatjuk. Minden 22 fordulat után az elhasználódott helyébe új, 22 g-nyi csiszolóport szórunk. A vizsgálatot mind kiszárított, mind vízzel telített próbakockán el kell végezni. A kopás mértéke, a kocka magasságcsökkenése mm-ben, illetve a térfogatcsökkenés cm^3-ben.

Az MSZ 4719:1958 szabvány – e vizsgálat alapján – a kopás mértéke szerint kemény, elsőrangú és másodrangú kopásálló betonokat különböztetett meg.



25.1. ábra. *Böhme* koptatóberendezésének vázlata

Ez a szabvány 1977-ig volt érvényben.

Ezt követte az MSZ 18290-1:1981 szabvány, amely 6 kopásállósági osztályt különböztetett meg (*25.1. táblázat*).

Jelenleg MSZ 4798-1:2004 szabvány van érvényben, amely 4 kopásállósági osztályt különböztet meg (*25.2. –25.3. táblázat*).

A *25.1. és 25.3. táblázat* összehasonlításából látható, hogy a *25.3. táblázat* csak 4 kopásállósági osztályt ad meg. Ez azzal magyarázható, hogy az új szabvány a *25.3. táblázatban* VI. jelű osztályt nem engedi meg. Az I. jelű kopásállóságú osztályt pedig csak különleges kopóréteggel lehet készíteni.

A Böhme-vizsgálatot szárazon és nedvesen egyaránt el kell végezni és kedvezőtlenebb eredmény alapján kell a *25.3. táblázat* alapján kitéti osztályba sorolni [*Kausay* (2008)].

25.3. táblázat. A kopásállóság követelménye az MSZ 4798-1:2004 alapján [Kausay (2008)]

Környezeti osztály	Kopásállósági osztály jele	Kopásállósági osztály megnevezése	A ΔV kopási térfogatveszteség megengedett mértéke mm^3-ben	
			Száraz	Vizes
			koptatás esetén	
XK1(H)	k14/21	mérsékelten kopásálló	14 000	21 000
XK2(H)	k12/18	kopásálló	12 000	18 000
XK3(H)	k10/15	fokozottan kopásálló	10 000	15 000
XK4(H)	k8/12	igen kopásálló	8 000	12 000
XK5(H)	k6/9	különlegesen kopásálló	6 000	9 000

Példa az osztályba sorolásra a kopás mértéke (térfogatcsökkenés) száraz koptatással 10250 mm^3, vizes koptatással 15 500 mm^3.

A kopási osztály jele k12/18, a környezeti osztály jele XK2(H).

A módszer hibái:

a) Csak egyenletes koptatóhatásnak (pl. lépcső) kitett betonok esetén ad megbízható adatot.

b) Ha a d_{max} (az adalékanyag legnagyobb névleges szemnagysága) 30 mm-nél nagyobb, akkor igen nagy lesz a vizsgálati eredmény szórása aszerint, hogy mekkora felületet foglal el a koptatottból az adalékanyag.

c) Műanyagkötésű betonokat nem szabad e módszerrel vizsgálni, mert folytonos vizsgálat esetén a súrlódás hatására fellépő hőmérséklet túllépi a gyanta lágyuláspontját.

Hibái ellenére ez a szokványos vizsgálat.

25.2.2. Duna-módszer

A vízben és a vízzel mozgó hordalék ütő-koptató hatását a legjobban a *Duna-módszer* utánozza. A készüléket a kopásálló vízépítési betonok vizsgálatára dolgozták kis és használták a svájci-német birsfeldeni (Water Power, 1955), az osztrák Ybbs-Persenbeug-i [*Uhl,* (1960)] és néhány csehszlovák [*Rigan* (1963)] duzzasztógát építése során.

A berendezés egy forgódob, amelynek a palástján 6 db 40×40 cm^2 lapméretű próbatestet helyezünk el teljesen vízzáró kapcsolattal. A koptatott felület kb. 35×35 cm^2. A koptatást a dobba helyezett 10 kg tömegű kaviccsal végezzük, amelynek összetétele:

20–30 mm-es rész	20 tömegszázalék
30–50 mm-es rész	40 tömegszázalék
50–80 mm-es rész	40 tömegszázalék

A dobba 10 liter vizet töltünk. A dob percenkénti fordulatszáma 60. 6 órán át az egyik, azután 6 órán át az ellenkező irányba forog, majd további 12–12 órán át az egyik, illetve a másik irányba. Az összes koptatási idő 36 óra. A kopás mértékét a koptatott felületre vonatkoztatva cm^3/cm^2-ben szokás megadni.

A módszer részletes leírását a 3.4.5.3. fejezet tartalmazza.

Hazánkban a Böhme-féle koptatási vizsgálatot 1951-ben szabványosították. Azóta a vizsgálati módszert – a magyar szabványokban – hatszor módosították. E szabványok általában a német szabványokat követték [*Kausay* (1983)].

Kausay (1983) *A betonok kopásállóságának a vizsgálata* című cikkében tizenegy módszert ismertet.

Az eddigi két módszeren kívül még az Ebener-módszert választottam ki. A vizsgálathoz a 150×150 mm méretű próbatestet külpontosan felerősítik egy forgó tányérra. A próbatestre egy megterhelt nyomófej golyókosarában lévő 5 db Ø180 mm méretű acélgolyó támaszkodik. A nyomófej saját tengelye körül forog és így a folyónyomok epicikloisok, amelyek a próbatesten nem ismétlődő vonalon futnak. A folyók koptató hatását a próbatest felületegységére eső térfogatveszteséggel fejezik ki és az asztalfordulatok számának függvényében ábrázolják.

25.3. A beton alkotóinak hatása a kopásállóságra

Kopásálló – a dolog természeténél fogva – csak az a beton lehet, amely egyben tartós is: a vízépítési és útépítési gyakorlatban ez általában fagyállóságot is jelent. Tekintve, hogy rendszerint a habarcs a beton puhábbik alkotója, *kopásálló beton igénye esetén a lehető legkisebb habarcstérfogatra és a lehető legnagyobb adalékanyagú térfogatra törekszünk.* Nagy adalékanyag-térfogat viszont csak úgy érhető el, ha maga az adalékanyag olyan szemmegoszlású, továbbá olyan alakú és felületű szemcsékből áll, hogy önmagában is a lehető legkisebb hézagtérfogatú halmazzá tömöríthető: ehhez általában folytonos, de főleg jól széthúzott, azaz minél nagyobb

legnagyobb névleges szemnagyságú adalékanyag kell (vízépítési beton esetén legalább 60 mm). Az ilyen megoszlású adalékanyagnak viszonylag kicsi a fajlagos felülete, s így viszonylag kicsi a habarcs-, illetve a vízigénye is.

A nagy szemű adalékanyaggal készített beton bedolgozása azonban komoly gépi felszerelést és tömörítő munkát kíván: a cementhabarcs mennyisége csökkenésével romlik a konzisztencia és a bedolgozhatóság. Különösen, ha érdes felületű, zúzott adalékanyagot használunk. Ez utóbbi esetben viszont jobb a habarcs és adalékanyag közti tapadás, ami az ütőszilárdságot fokozza, a szemcsék kilazulását megakadályozza. A nehéz bedolgozhatóság buborékképző vegyi anyagokkal ugyan javítható, s ez fagyállóság szempontjából is előnyös, kopásállóság szempontjából azonban hátrányos. A bedolgozhatóság képlékenyítő szerekkel is javítható (ezek egyúttal buborékképzők is rendszerint), viszont ez esetben a kopásállóság romlik [(*Rigan* (1963)]. A nyomó-, húzó-, ütőszilárdság és kopásállóság idővel nő, de az arányok eltolódnak: például a beton ütőszilárdsága 90 napos korban eléri a 28 napos ütőszilárdság kétszeresét.

A kopásállósághoz nagy statikus szilárdság is tartozik: ehhez homogén portlandcement kell, nagy C_3S-tartalommal. Az ilyen betonnak viszont nagy a kötéshője, s a hőfeszültségek és zsugorodási repedések elkerülése külön gondot jelent. A váltakozva kiszáradó és átnedvesedő betonban az adalékanyagok víztartalom-változás okozta duzzadása és zsugorodása járulékos feszültségeket, és tapadás-megbomlást eredményezhet.

Mindezek figyelembevételével a kopásálló beton készítésében döntő szerepe van
a beton anyagai kopásállóságának,
a betonösszetételnek,
a betonkészítés technológiájának.

25.3.1. A betonösszetétel hatása a beton kopásállóságára

[*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

A kísérletek elsődleges célja annak megállapítása, hogy az ipari betonpadozat betonja kopásállósága szempontjából a kvarckavics, andezit és bazalt adalékanyagok egymást helyettesíthetik-e?

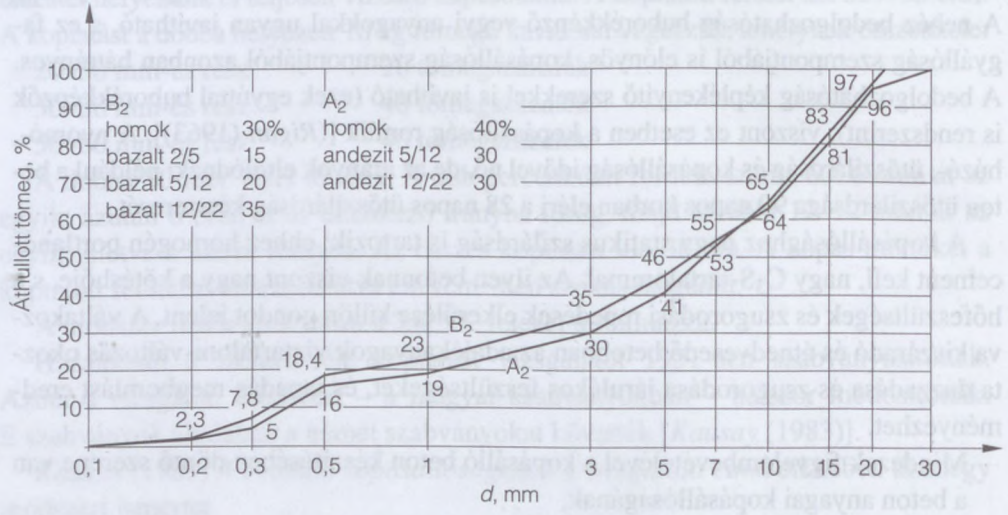
25.3.2. A vizsgálat

25.3.2.1. A felhasznált anyagok, a vizsgálat módszere

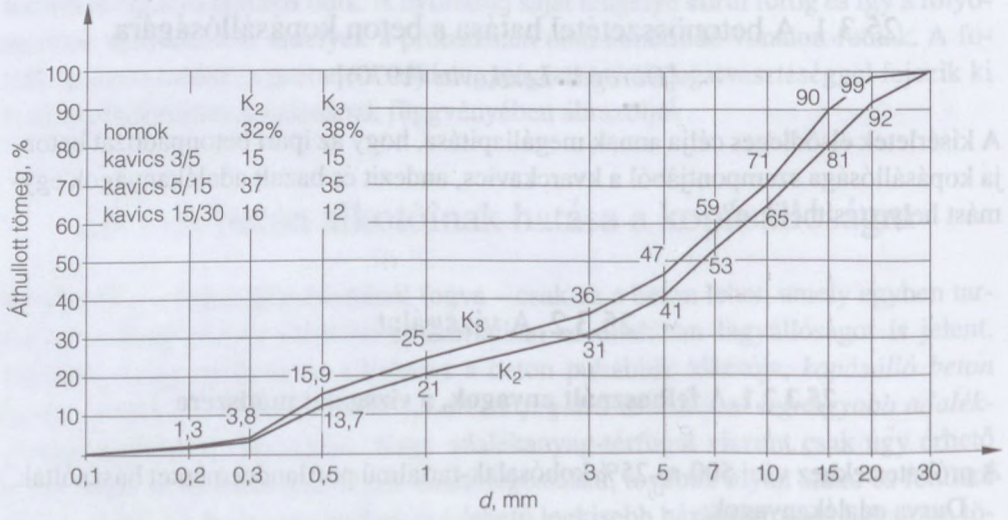
A próbatestekhez váci 500-as 25% kohósalak-tartalmú portlandcementet használtak.
Durva adalékanyagok:
szobi andezit: 5/12 és 12/22-es frakciók,

zalahalápi bazalt: 2/5; 5/12 és 12/22 mm-es frakciók,
dunai kvarckavics: 3/5; 5/15 és 15/30 mm-es frakciók.
Finom adalékanyag: dunai homok.

Betonozáshoz 8 féle szemeloszlási görbét állítottak össze: A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, K_1, K_2 és K_3 jelöléssel. Ezek közül az 1. jelű mindig a homokszegényebb. A *25.2. és 25.3. ábrákon* feltüntettük a kopásvizsgálathoz kiválasztott A_2, B_2, K_2, K_3 jelű szemeloszlási görbéket.



25.2. ábra. Bazalt- és andezitbetonok adalékanyagának szemeloszlási görbéi MSZ 4713:1955 szerint [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]



25.3. ábra. Kavicsbetonok adalékanyagának szemeloszlási görbéi

Eme adalékanyagokkal, háromféle cementtartalommal (250, 350 és 450 kg/m^3) és 2–3 féle víz-cement tényezővel fajtánként 6–6 db 7×7×25 cm méretű betonhasábokat készítettek.

A cementtartalmat, a víz-cement tényezőt, az adalékanyag fajtáját, szilárdságokat a *25.4. táblázatban* foglaltuk össze.

25.4. táblázat. A betonok szilárdsága és testsűrűsége [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

Kísérlet jele	Cement-tartalom kg/m^3	m_w/m_c	Durva adalék fajtája	Tömörödési mérőszám	Hajlító-húzószilárdság		Nyomószilárdság		Testsűrűség	
					egyes	átlag	egyes	átlag	egyes	átlag
					MPa		MPa		kg/m^3	
1.	2.	3.	4.	5.	6.		7.		8.	
16	350	0,5	Andezit	0,74	5,06 4,90 4,58 6,18 5,22 5,40	5,223	30,6 31,4 29,4 28,2 29,6 29,2	2,97	2340 2350 2350 2370 2330 2370	2353
17	350	0,4	Andezit	0,65	6,56 5,62 5,92 5,84 6,31 6,62	6,145	44,0 34,4 39,0 38,2 43,6 46,6	409,6	2310 2385 2355	2350
18	350	0,6	Andezit	0,88	4,06 4,00 4,53 4,40 3,46 4,20	4,098	26,2 20,2 21,4 20,2 21,2 20,8	216,6	2250 2250 2250 2370	2257
36	250	0,5	Andezit	0,73	1,70 3,00 3,65 3,50 3,54 3,92	3,218	22,6 22,6 24,2 23,6 19,8 24,0	196	2330 2320 2340	2330
37	250	0,6	Andezit	0,82	1,70 3,00 3,65 3,50 3,54 3,92	3,218	21,0 19,0 19,8 19,0 19,0 19,8	196	2310 2310 2300 2320 2320 2345	2317
38	250	0,7	Andezit	0,89	1,87 2,75 2,46 2,56 2,62 2,14	2,40	15,4 13,8 15,0 13,8 14,8 15,0	146,6	2305 2289 2295 2300 2315 2270	2296

25.4. táblázat (folyt.) A betonok szilárdsága és testsűrűsége [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

Kísérlet jele	Cement-tartalom kg/m³	m_w/m_c	Durva adalék fajtája	Tömörödési mérőszám	Hajlító-húzó-szilárdság		Nyomószilárdság		Testsűrűség	
					egyes	átlag	egyes	átlag	egyes	átlag
					MPa		MPa		kg/m³	
1.	2.	3.	4.	5.	6.		7.		8.	
48	450	0,3	Andezit	0,64	7,58 7,65 7,22 6,05 6,55 6,85	6,983	53,4 52,0 44,4 48,8 49,4 45,2	488,6	2400 2395 2370 2340 2310 2320	2354
49	450	0,4	Andezit	0,72	5,90 6,45 5,75 6,40 7,18 6,32	6,33	40,0 39,2 38,6 42,2 41,4 42,6	406,4	2390 2370 2400 2390 2400 2390	2390
50	450	0,5	Andezit	0,92	4,16 4,75 5,34 4,72 4,65 4,62	4,71	26,8 27,8 29,4 27,0 23,4 26,2	267,7	1970 1950 1970 2160 2090 2080	2037
54	450	0,36	Andezit	0,61	6,58 6,55 5,08 6,14 6,49 6,46	6,21	47,8 47,8 34,4 46,4 48,0 48,0	454	2360 2290 2230 2300 2340 2350	2312
4	350	0,5	Bazalt	0,73	6,92 6,85 7,12 7,20 7,56 7,11	7,226	40,0 46,4 41,0 45,5 45,3 43,5	436	2500 2500 2500 2540 2530 2530	2517
5	350	0,4	Bazalt	0,66	7,85 7,85 7,85 7,80 8,50 7,06	7,819	53,4 54,7 55,5 57,2 54,1 57,0	553	2470 2500 2490 2540 2520 2500	2503
6	350	0,6	Bazalt	0,89	5,17 4,74 6,05 1,74 6,20 5,62	4,92	34,0 29,4 31,0 35,0 33,6 32,6	326	2450 2450 2480 2520 2470 2430	2466

25.4. táblázat (folyt.) A betonok szilárdsága és testsűrűsége [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

Kísérlet jele	Cement-tartalom kg/m³	m_w/m_c	Durva adalék fajtája	Tömörödési mérőszám	Hajlító-húzószilárdság		Nyomószilárdság		Testsűrűség	
					egyes	átlag	egyes	átlag	egyes	átlag
					MPa		MPa		kg/m³	
1.	2.	3.	4.	5.	6.		7.		8.	
59	250	0,5	Bazalt	0,71	6,84 4,26 4,72 4,63 4,72 4,61	4,93	35,4 30,0 25,4 31,4 29,2 31,8	305	2420 2370 2390 2410 2400 2470	2410
60	250	0,7	Bazalt	0,82	4,00 3,91 4,38 3,42 3,64 4,16	4,068	19,0 20,2 22,8 20,8 24,0 22,2	215	2440 2455 2460 2490 2490 2490	2471
65	450	0,45	Bazalt	0,74	7,08 6,54 7,49 7,44 7,09 7,13	7,13	49,0 44,0 47,0 48,0 45,2 48,4	469	2410 2410 2420 2440 2430 2430	2423
82	350	0,4	Kavics 3	0,71	5,76 4,73 5,16 5,62 5,17 5,42	5,31	42,0 42,4 41,8 45,2 44,6 42,4	430	2310 2390 2360 2380 2350 2330	2353
83	350	0,5	Kavics 3	0,76	4,96 4,62 5,09 5,43 5,33 5,15	5,09	38,2 35,8 32,4 35,0 36,0 35,8	356	2410 2410 2430 2410 2440 2405	2419
88	450	0,35	Kavics 3	0,73	6,10 6,28 5,36 5,57 6,18 5,37	5,81	48,6 46,2 43,8 42,0 47,0 46,2	456	2370 2330 2460 2390 2390 2385	2387
89	450	0,45	Kavics 3	0,93	4,89 5,08 5,61 5,57 5,47 6,00	5,44	37,4 37,6 37,4 35,8 32,8 35,2	360	2420 2280 2500 2390 2430 2410	2405

25.4. táblázat (folyt.) A betonok szilárdsága és testsűrűsége [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

Kísérlet jele	Cement-tartalom kg/m³	m_w/m_c	Durva adalék fajtája	Tömörödési mérőszám	Hajlító-húzó-szilárdság		Nyomószilárdság		Testsűrűség	
					egyes	átlag	egyes	átlag	egyes	átlag
					MPa		MPa		kg/m³	
1.	2.	3.	4.	5.	6.		7.		8.	
90	450	0,55	Kavics 3	0,99	4,72 4,84 4,66 4,26 4,57 3,97	4,50	27,8 26,6 28,6 24,6 25,2 25,4	263	2370 2330 2500 2410 2420 2400	2400
94	350	0,4	Kavics 2	0,72	5,87 6,17 5,78 5,36 5,93 5,42	5,76	44,2 45,4 46,6 45,0 46,4 39,6	447	2460 2435 2400 2400 2430 2420	2429
95	350	0,5	Kavics 2	0,93	5,05 3,39 4,88 4,63 4,65 4,59	4,52	33,2 34,0 33,6 30,6 31,8 31,4	324	2420 2460 2420 2440 2420 2440	2433
101	450	0,45	Kavics 2	0,95	5,16 4,46 5,73 5,93 6,00 5,54	5,63	36,8 38,4 40,0 39,8 36,6 43,0	391	2440 2420 2470 2440 2430 2350	2410

A hasábokat harmadpontos terheléssel terhelve (24 cm fesztávon) határozták meg a hajlító-húzó szilárdságot, majd az eltört próbatest egyik darabján a nyomószilárdságot.

A próbatest másik darabjából 7 cm élhosszúságú kockákat fűrészeltek ki a Böhme-kopásvizsgálathoz. Ezeket kiszárított állapotban koptatták. A kopásvizsgálat eredményeit a *25.5. táblázat,* a szemalak jellemzését a *25.6. táblázat* szemlélteti.

25.3.2.2. A vizsgálatok eredményeinek értékelése

a) A nyomó- és hajlító-húzó szilárdság értékelése az adalékanyag, a víz-cement tényező, a cementtartalom és konzisztencia-mérőszám függvényében.

A kísérlet során a sok változó figyelembevételével megkapott kísérleti eredmények közül azokat tekintették egyenértékűnek, amelyek konzisztencia-mérőszáma (tömörödési mérőszáma) azonos volt.

25.5. táblázat. A beton kopása Bauschinger-Böhme-féle berendezésen vizsgálva [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

Kísérlet jele	Cement-tartalom kg/m³	m_w/m_c	Adalék-anyag fajtája	Kopás mértéke			
				magasságcsökkenés (mm)		tömegcsökkenés (mm)	
				egyedi	átlag	egyedi	átlag
16	350	0,5	A 2	4,50 5,04 4,14 4,30	4,49	49,5 56,2 46,8 45,9	49,85
17	350	0,4	A 2	3,59 4,52 4,42 3,73	4,06	44,0 50,3 49,5 44,5	47,08
18	350	0,6	A 2	5,59 5,01 5,15 5,32	5,36	58,0 49,5 50,7 53,0	52,8
36	250	0,5	A 2	3,75 4,38 4,53 4,22	4,22	43,0 52,0 48,0 47,7	47,7
37	250	0,6	A 2	3,50 4,28 4,10 5,30	4,29	35,5 49,0 41,5 50,0	48,8
38	250	0,7	A 2	5,82 4,75 5,33 6,50	5,60	58,0 52,0 58,0 63,5	57,9
48	450	0,3	A 2	3,88 4,17 3,45 3,88	3,84	41,0 45,0 33,3 51,5	42,7
49	450	0,4	A 2	2,25 2,85 2,73 3,20	2,76	25,6 31,0 28,9 34,0	29,9
50	450	0,5	A 2	5,22 5,65 3,90 3,80	4,65	45,5 52,0 37,0 39,5	43,5
4	350	0,5	B 2	3,25 2,92 3,45 3,67	3,32	37,0 35,0 40,0 42,0	38,5

25.5. táblázat (folyt.) A beton kopása Bauschinger-Böhme-féle berendezésen vizsgálva [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

Kísérlet jele	Cement-tartalom kg/m³	m_w/m_c	Adalék-anyag fajtája	Kopás mértéke			
				magasságcsökkenés (mm)		tömegcsökkenés (mm)	
				egyedi	átlag	egyedi	átlag
5	350	0,4	B 2	3,33 3,10 2,95 3,00	3,09	36,5 40,0 34,0 29,5	35,0
6	350	0,6	B 2	4,45 3,60 4,05 4,62	4,20	52,0 44,0 47,0 50,0	48,2
59	250	0,5	B 2	4,25 3,05 3,65 3,90	3,71	38,1 32,7 37,4 36,9	37,2
60	250	0,7	B 2	4,22 4,42 4,40 4,07	4,28	54,0 50,0 50,0 48,0	50,5
65	450	0,45	B 2	2,65 2,80 2,45 2,60	2,62	33,0 26,7 32,4 32,4	31,1
82	350	0,4	K 3	2,10 2,17 2,20 2,45	2,23	23,0 26,0 26,0 27,0	25,5
83	350	0,5	K 3	2,60 2,18 2,70 2,40	2,47	29,2 28,0 26,7 29,6	28,4
88	450	0,35	K 3	2,15 2,10 2,17 2,35	2,19	25,0 25,0 25,0 26,0	25,6
89	450	0,45	K 3	2,18 2,48 1,80 2,50	2,24	25,2 25,0 24,6 26,8	25,6
90	450	0,55	K 3	2,22 2,30 2,35 2,45	2,34	24,0 24,0 25,0 27,0	25,0

25.5. táblázat (folyt.) A beton kopása Bauschinger-Böhme-féle berendezésen vizsgálva [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

Kísérlet jele	Cement-tartalom kg/m³	m_w/m_c	Adalék-anyag fajtája	Kopás mértéke			
				magasságcsökkenés (mm)		tömegcsökkenés (mm)	
				egyedi	átlag	egyedi	átlag
94	350	0,4	K 2	2,15 2,45 2,32	2,31	24,0 25,0 26,0	25,0
95	350	0,5	K 2	2,45 2,65 2,25 2,13	2,37	27,5 29,3 25,6 24,0	26,6
101	450	0,45	K 2	2,35 2,33 1,93 2,03	2,16	27,5 26,8 24,1 24,8	25,8

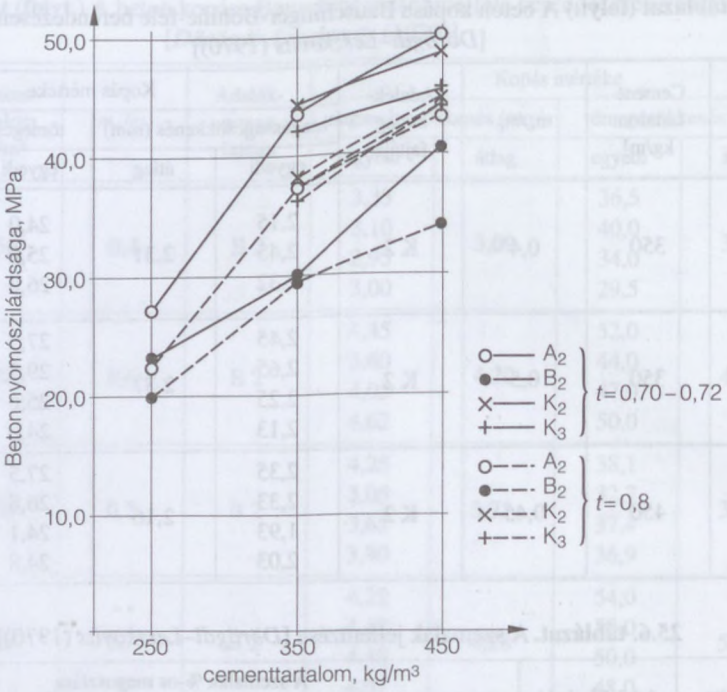
25.6. táblázat. A szemalak jellemzése [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

Adalékfajta	Adalékfrakció	A szemalak %-os megoszlása			
		zömök	lemezes	hosszúkás	lemezes és hosszúkás
Duna-kavics	3/5	68	1	1	30
	5/15	58	10	0	32
	15/30	52	15	5	28
Bazalt	2/5	20	39	19	22
	5/12	22	26	23	29
	12/22	33	20	15	31
Andezit	5/12	17	25	25	33
	12/22	21	35	24	20

0,7, illetve 0,8 Glanville-féle tömörödési mérőszámot különböző (0,35–0,55) vízcement tényezővel, különböző cementtartalommal készített betonok adtak, az alaki tényezők lényeges eltérése miatt. A különböző szemmegoszlások közül a 2. jelűek adták a jobb szilárdságokat (kopásnál csak az A_2, B_2, K_2, K_3 jelű szemmegoszlású adalékanyaggal készített betonokat vizsgálták). Az andezittel készített betonok voltak a legkisebb szilárdságúak, a bazalt és Duna-kavics adalékanyaggal közel azonos szilárdságok adódtak.

A beton nyomószilárdságának változását a cementtartalom függvényében a *25.4. ábra* mutatja.

A beton szilársága hatékonyan növelhető a tömörség növelésével. A beton nyomószilárdságát hajlító-húzó szilárdsága függvényében ábrázoltuk (*25.5. ábra*).



25.4. ábra. A beton nyomószilárdsága a cementtartalom függvényében [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

b) A koptatási vizsgálat eredményei és értékelésük

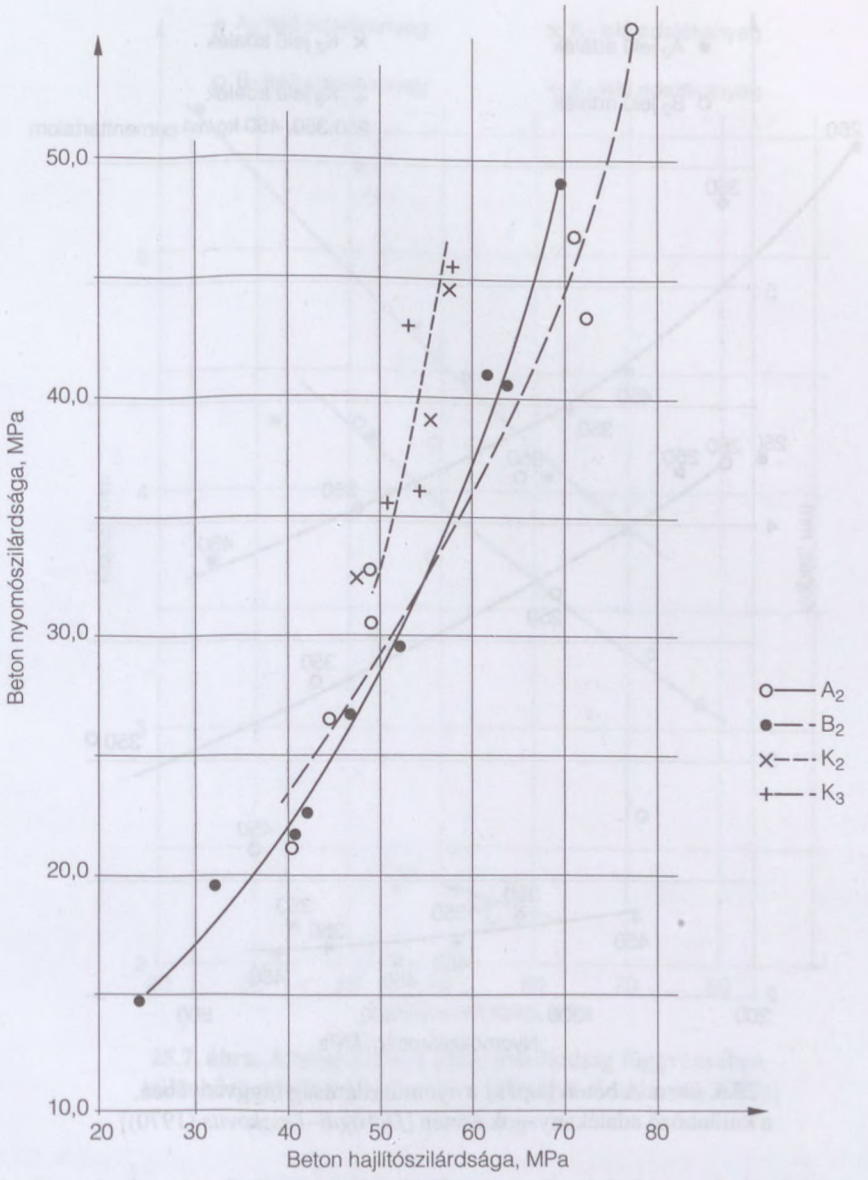
Irodalmi adatok és tanszéki kísérletek alapján a *Böhme*-kopás eredményei csak a nyomószilárdsággal adnak elfogadható összefüggést.

Mint az előző pontból kiderült, különböző adalékanyaggal, cementtartalommal, víz-cement tényezővel állítottak elő 15,0–55,0 MPa nyomószilárdságú betonokat.

A nyomószilárdság és a kopás mértékét grafikonba felrakva (*25.6. ábra*) azt az eredményt kapták, hogy különböző alkotóelemekből döntő meghatározó szerepe a durva adalékanyag fajtájának van. A vizsgált andezitbeton, bazaltbeton, kavicsbeton kopási mértékei jól elkülönülten meghatározható, a szilárdságtól függő görbék mentén helyezkednek el.

A vizsgálat eredménye alapján az MSZ 4719:1958 szerint a kavicsbeton (2,0–2,5 mm kopás), a bazaltbeton (2,5–4,3 mm kopás), az andezitbeton (3,5–5,5 mm kopás) elsőrangú kopásálló betonnak minősíthető. A kopásállóságát tekintve tehát a kvarckavics adalékanyag a legjobb. Ha azonban a koptató hatás ütőhatással párosul, valószínűen elhasadnak a kvarckavicsszemcsék, és így abban az esetben az a legrosszabb.

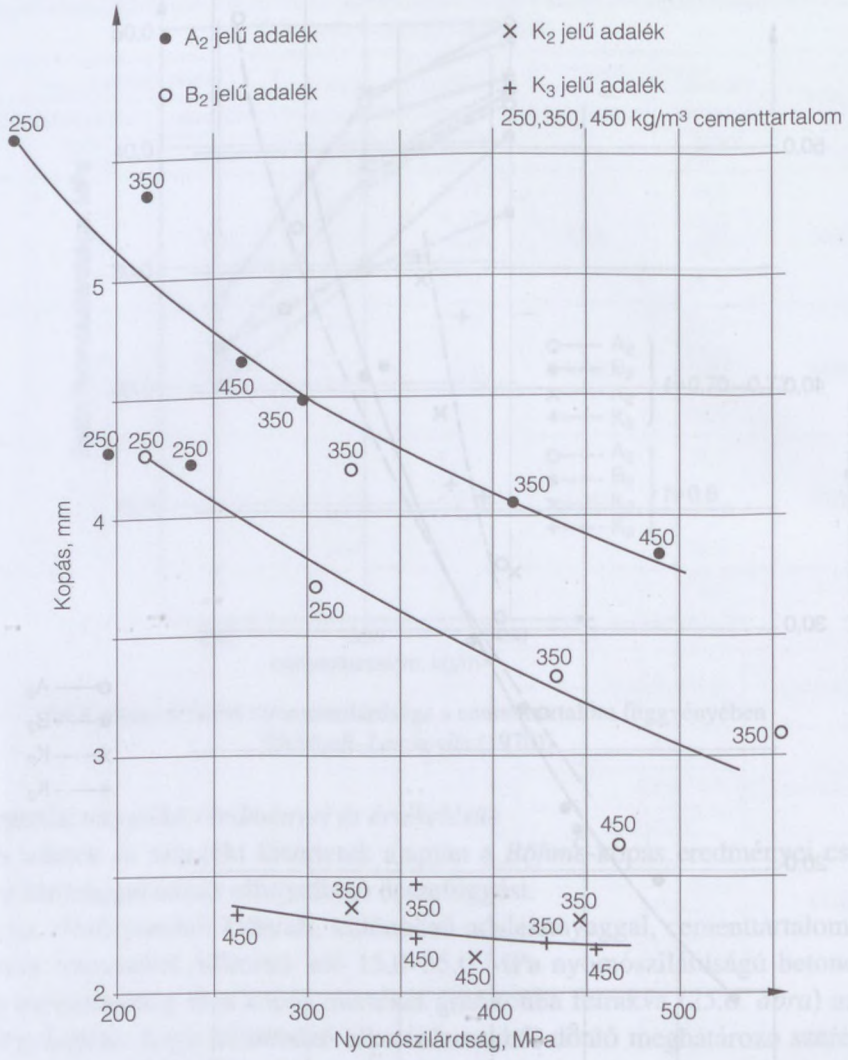
A görbék lefutása mentén a betonok cementtartalma nem mutat összefüggést, viszont a víz-cement tényező igen, de ez nem a kopáscsökkenés és víz-cement tényező csökkenés összefüggésének tulajdonítható, hanem inkább a szilárdság növekedése és



25.5. ábra. A beton nyomószilárdsága a hajlítószilárdsága függvényében [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

a víz-cement tényező csökkenése összefüggésének. A beton kopása a hajlító-húzószilárdság függvényében (*25.7. ábra*) az előző grafikonhoz teljesen hasonló összefüggést ad, ami a hajlító-húzó- és nyomószilárdság közötti közel lineáris összefüggéssel magyarázható.

A kétféle kopásmérték (tömegcsökkenés, magasságcsökkenés) között összhang van (*25.8. ábra*), ezért nem nézték meg a tömegcsökkenést a szilárdság függvényében.

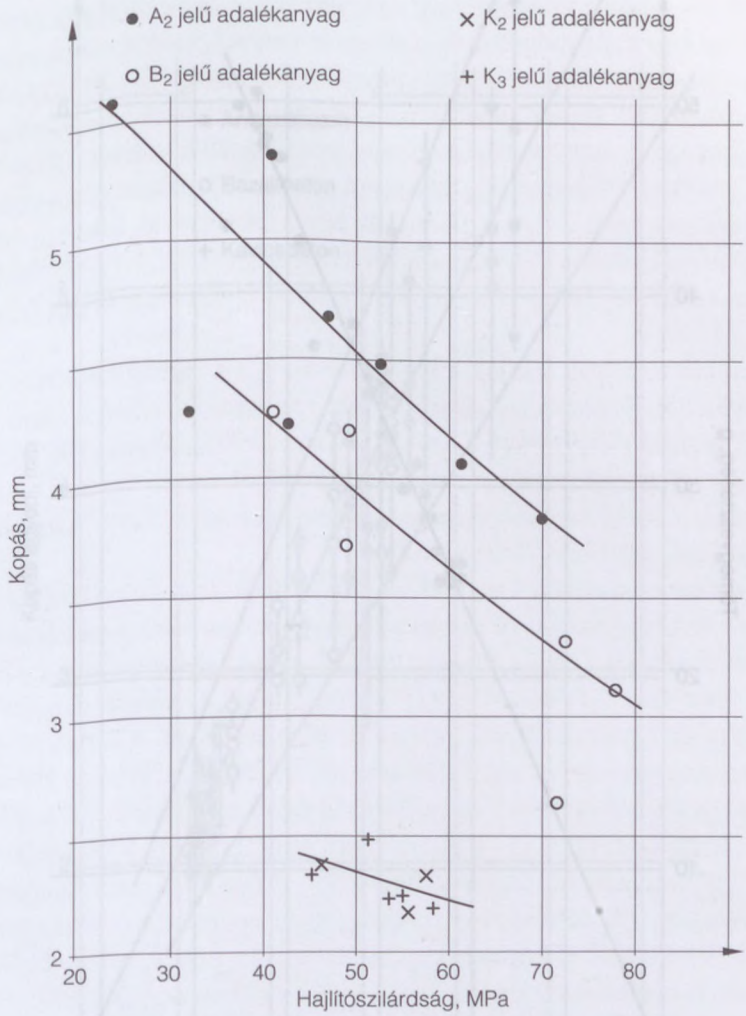


25.6. ábra. A beton kopása a nyomószilárdság függvényében, a különböző adalékanyagok esetén [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

A kopási értékek az előző ábrákon 4 próbatest átlagértékeit jelentik. Az egyedi értékek szórását a *25.9. ábra* mutatja. Az ábra szerint a kis kopású betonok kopásának a szórása is kicsi. A variációs tényezője itt valamennyi betonnak közel azonos.

Ezeknek a kísérleteknek elsődleges célja az volt, hogy a különböző adalékanyagoknak az ipari betonpadozat szempontjából az egymással való helyettesíthetőségét határozzuk meg.

A kísérleti eredmények szerint nyomó- és hajlító-húzószilárdság szempontjából a helyettesítés lehetősége fennáll, a kopás szempontjából azonban nem egyenértékűek.



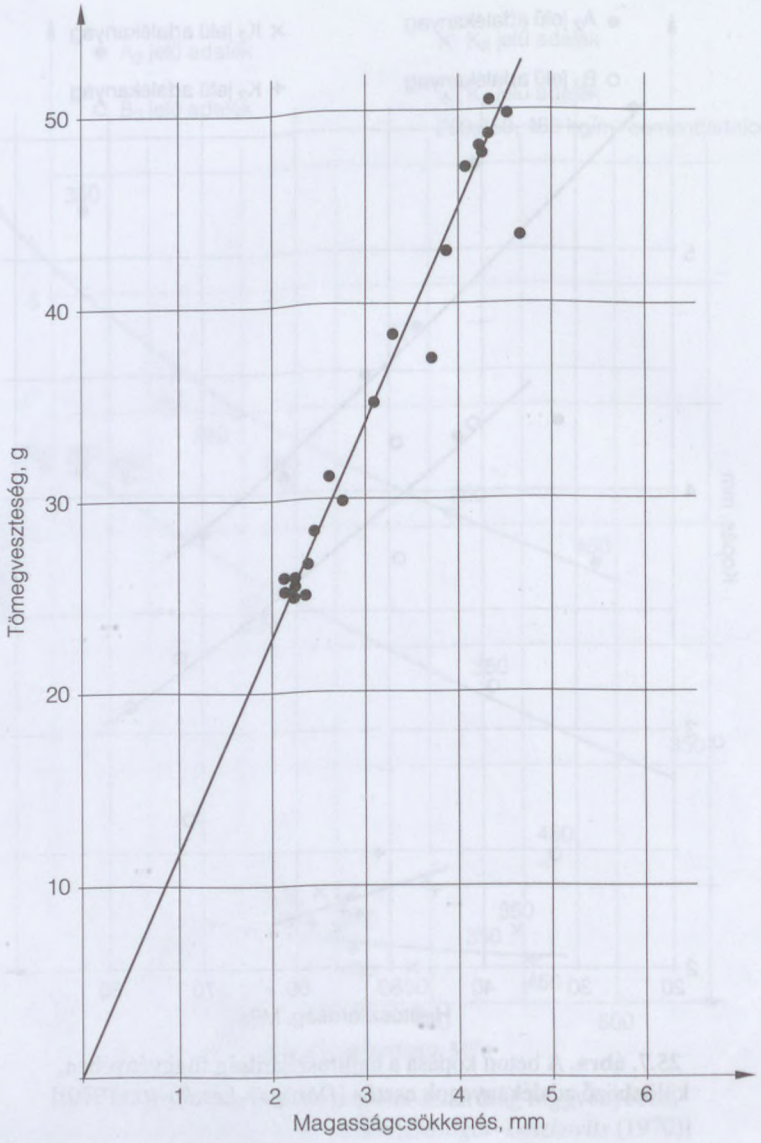
25.7. ábra. A beton kopása a hajlítószilárdság függvényében, különböző adalékanyagok esetén [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

25.3.3. Kopásálló vízépítési beton

[*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

25.3.3.1. Bevezetés

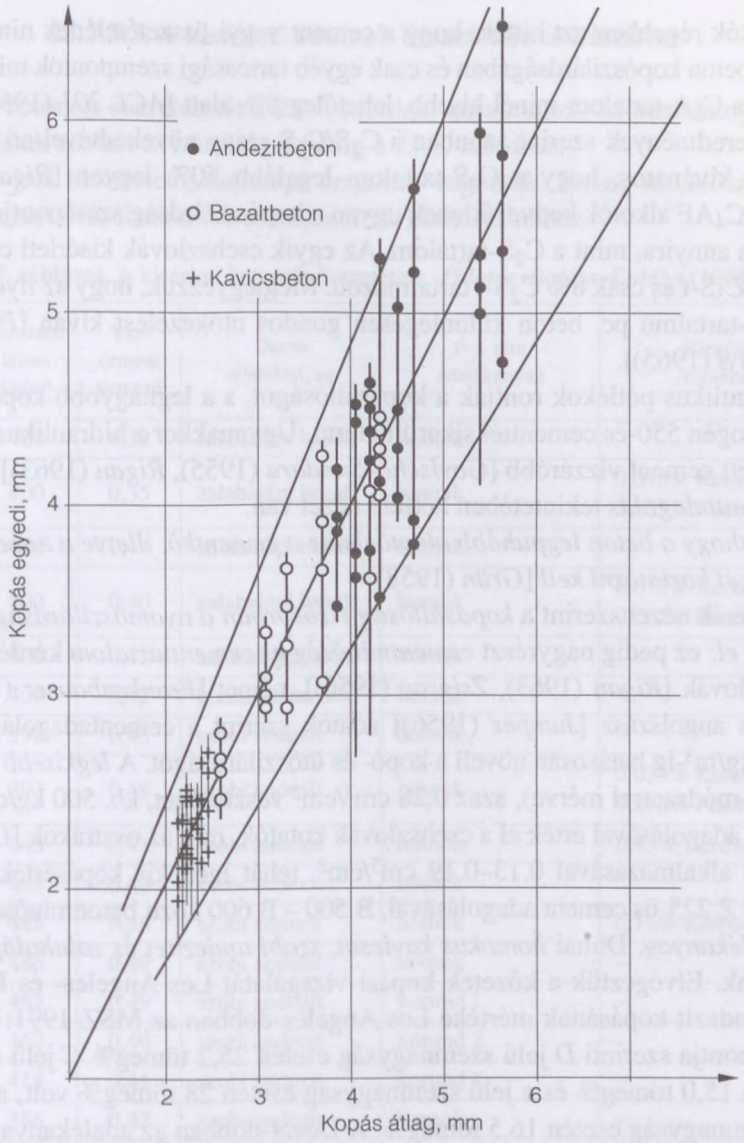
A nagyobb vízépítési műtárgyakba beépítésre kerülő, nagy mennyiségű beton túlnyomó részével szemben *nem mechanikai, hanem tartóssági* követelményeket támasztunk. A vízépítési műtárgyak betonjának tartósságát – ha a mozgó víz és horda-



25.8. ábra. A *Böhme* szerinti kétféle kopásmérték közötti összefüggés [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

lék (beleszámítva a jeget is) hatásának van kitéve, fagypont alatti és feletti hőmérsékleten egyaránt – a következő tényezők befolyásolják: kopásállóság, fagyállóság, vízzáróság, ellenállás a kavitáció és az úszó tárgyak okozta ütésekkel szemben (ütőszilárdság), ellenállás a külső (víz és hordalék agresszivitása) és a belső (cementpép és hordalék közti reakció) vegyi hatásokkal szemben stb.

Kísérleteink során a *kopás szempontjából legkedvezőbb összetételt kerestük, de megvizsgáltuk a betonok vízzáróságát és fagyállóságát is.*



25.9. ábra. A *Böhme*-féle kopásvizsgálati eredmények szórása [*Dörögdi–Leszkovits* (1970)]

25.3.3.2. A kísérlethez felhasznált anyagok

a) Cement

Tatabányai 600-as *portlandcementet* használtunk: Ásványi összetétel: 59,3% C_3S, 15,8% C_2S, 11,9% C_3A, 8,6% C_4AF, 0,4% $CaSO_4$ és 4% MgO. Fajlagos felülete: 2900 cm^2/g Blaine szerint. Földnedves habarcsvizsgálattal megállapított nyomószilárdsága 2, 7, illetve 28 napos korban 30,1, 50,2, illetve 61,1 MPa.

A kutatók régebben azt hitték, hogy a cement vegyi összetételének nincs jelentős szerepe a beton kopószilárdságában és csak egyéb tartóssági szempontok miatt javasolták, hogy a C_3A-tartalom minél kisebb, lehetőleg 8% alatt [*ACL 201* (1959)] legyen.

Újabb eredmények szerint azonban a C_3S/C_2S arány növekedtével nő a kopószilárdság, s kívánatos, hogy a C_3S-tartalom legalább 50% legyen [*Rigan* (1963)]. A C_3A és C_4AF alkotók kedvezőtlenek ugyan a kopószilárdság szempontjából, de távolról sem annyira, mint a C_2S-tartalom. Az egyik csehszlovák kísérleti cement például 70% C_3S-t és csak 8% C_2S-t tartalmazott. Megjegyezzük, hogy az ilyen kirívóan nagy C_3S-tartalmú pc. beton különlegesen gondos utókezelést kíván [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)].

A hidraulikus pótlékok rontják a kopásállóságot, s a legnagyobb kopószilárdságot a homogén 550-es cementtel sikerült elérni. Ugyanakkor a hidraulikus pótlékokkal készített cement vízzáróbb [*Govische–Sundara* (1955), *Rigan* (1963)].

A *cementadagolás* tekintetében kétféle nézet van.

a) Minthogy a beton legpuhább alkotóeleme a cementkő, illetve a habarcs, ennek mennyiségét korlátozni kell [*Grün* (1958)].

b) A másik nézet szerint a *kopásállóság elsősorban a nyomószilárdság növelésével érhető el:* ez pedig nagyrészt *cementminőség* és *cementtartalom* kérdése.

Csehszlovák [*Rigan* (1963), *Zsigray* (1956)], német [*Frankenbauser* (1961), *Uhl* (1960)] és angolszász [*Jumper* (1956)] adatok szerint a cementadagolás fokozása 450–500 kg/m^3-ig hatásosan növeli a kopó- és ütőszilárdságot. A *legkisebb kopásértéket* (Duna-módszerrel mérve), azaz 0,28 cm^3/cm^2 veszteséget, kb. 500 kg/cm^3 C 550-es cement adagolásával érték el a csehszlovák kutatók, míg az osztrákok [*Uhl* (1960)] műkorund alkalmazásával 0,13–0,19 cm^3/cm^2, tehát igen kis kopásértéket értek el 500 kg/m^3 Z 225-ös cement adagolásával, B 500 – B 600 közti betonminőséggel.

c) Adalékanyag. Dunai *homokos kavicsot, szobi andezitet és zalahalápi bazaltot* használtunk. Elvégeztük a kőzetek kopási vizsgálatát Los Angeles- és Deval-dobban. Az andezit kopásának mértéke Los Angeles-dobban az MSZ 1991:1960 szabvány 11. pontja szerinti *D* jelű szemnagyság esetén 25,2 tömeg% *C* jelű szemnagyság esetén 15,0 tömeg% és a jelű szemnagyság esetén 28 tömeg% volt, a bazalté, a *B* jelű szemnagyság esetén 16,5 tömeg%. A Deval-dobban az adalékanyag 40/65-ös frakcióját vetettük alá száraz koptatásnak és a Deval-érték andezit, illetve bazalt esetén 25-re, illetve 26,6-ra adódott.

A kísérletek során 98% Al_2O_3 tartalmú *korundhomokot* is felhasználtunk, amelynek szemnagysága 0,18–0,21 mm (2 jelű), illetve 0,70–0,85 mm (*1* jelű) volt.

Betonjavító adalékok

Konzisztenciajavító anyagként Plastolt, légpórusképzőként Kerasolt használtunk.

25.3.3.3. A kísérleti betonok összetétele és készítése

A kísérleti betonok összetételét a *25.7. táblázat* tartalmazza, az adalékanyag szemmegoszlásának adatait és minőségét pedig a *25.8. táblázat*.

Az 1–5. jelű kísérletet *zalahalápi bazalttal* végeztük. Ennek időállósága közismerten jó, ezért összehasonlításul használtuk kísérleteinkhez.

25.7. táblázat. A kísérleti betonok összetétele [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

Kísérlet jele	Cementtartalom kg/m³	Víz-cement tényező	Durva adalékanyag	0–1 mm adalékanyag	Kiegészítő adalékszer
1	400	0,39	zalahalápi bazalt	homok	–
2	400	0,35	zalahalápi bazalt	homok	0,075% Kerasol + 0,255% Plastol
3	400	0,44	zalahalápi bazalt	homok	–
4	400	0,40	zalahalápi bazalt	homok	0,075% Kerasol + 0,255% Plastol
5	400	0,42	zalahalápi bazalt	homok	–
6	400	0,42	homokos kavics	homok	–
7	396	0,45	szobi andezit	homok	–
8	397	0,48	szobi andezit	homok	0,075% Kerasol + 0,255% Plastol
9	445	0,41	szobi andezit	homok	0,15% Kerosol
10	445	0,46	szobi andezit	homok	
11	488	0,36	szobi andezit	homok	0,15% Kerosol
12	486	0,49	szobi andezit	homok	–
13	462	0,49	szobi andezit	korund 1	–
14	462	0,49	szobi andezit	korund 2	–
15	415	0,41	szobi andezit	korund 1	–
16	386	0,42	szobi andezit	homok	–
17	400	0,41	szobi andezit	homok + korund 2	–
18	400	0,43	homokos kavics	korund 2	–
19	391	0,43	homokos kavics	–	–
20	400	0,40	homokos kavics	homok + korund 2	–

+ Benne 14% NZ 25/40 zalahalápi bazalt.

A 6. jelű kísérlet során *„D"* görbe szerinti *dunai homokos kavics* adalékanyagot, a 19. és 20. kísérletben 4 frakcióból előállított *felsőzsolcai bányakavicsot* és homokot használtunk (I).

A 7–17. jelű kísérletek betonját *szobi andezittel* készítettünk, a 0–5 mm-es rész dunahomok volt. Részben osztályozott dunahomokot használtunk, részben annak 0–1 mm-es frakcióját korundhomokkal helyettesítettük, részben osztályozatlan homokot használtunk.

25.8. táblázat. Az adalékanyagok minősége és szemmegoszlása [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

Beton jele	Szemmegoszlás jele	Adalékanyag szemmegoszlása	Adalékanyag megnevezése
1–2	*A* (5,98)	40% NZ 20/40	zalahalápi bazalt
		10% NZ 12/22	zalahalápi bazalt
		15% NZ 5/12	zalahalápi bazalt
		10% NZ 0/5	zalahalápi bazalt
		20% 0–5 mm-es	csepeli mosott homok
		5% 0–1 mm-es	diósdi öntőhomok
3–4	*B* (6,63)	22% NZ 40/65	zalahalápi bazalt
		23%NZ 20/40	zalahalápi bazalt
		12% NZ 12/22	zalahalápi bazalt
		15% NZ 5/12	zalahalápi bazalt
		8,4% 3–5 mm-es	Duna-homok
		7% 1–3 mm-es	Duna-homok
		12,6% 0–1 mm-es	diósdi öntőhomok
5	*C* (5,54)	30% NZ 20/40	zalahalápi bazalt
		10% NZ 12/22	zalahalápi bazalt
		15% NZ 5/12	zalahalápi bazalt
		10% NZ 0/5	zalahalápi bazalt
		30% 0–5 mm-es	csepeli mosott homok
		5% 0–1 mm-es	diósdi öntőhomok
6	*D* (5,69)	14% NZ 25/40	zalahalápi bazalt
		6% 25–40 mm	Duna-kavics
		15% 15–25 mm	Duna-kavics
		25% 5–15 mm	Duna-kavics
		12% 3–5 mm	Duna-kavics
		10% 1–3 mm	Duna-kavics
		18%0–1 mm	Duna-kavics
7–8	*E*	22% NZ 40/65	szobi andezit
		23% NZ 20/40	szobi andezit
		12% NZ 12/22	szobi andezit
		15% NZ 5/12	szobi andezit
		7,5% 3–5 mm	Duna-homok
		4,2% 1–3 mm	Duna-homok
		2,5% 0,5–1 mm	Duna-homok
		6,2% 0,24–0,5 mm	Duna-homok
		7,5% 0,24 mm-nél kisebb	Duna-homok

25.8. táblázat (folyt.) Az adalékanyagok minősége és szemmegoszlása [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

Beton jele	Szemmegoszlás jele	Adalékanyag szemmegoszlása	Adalékanyag megnevezése
9–12	F_3 (6,53)	22% NZ 40/65 23% 20/40 12% NZ 12/22 15% NZ 5/12 8,4% 3–5 mm-es 7,0% 1–3 mm-es 12,6% 0–1 mm-es	szobi andezit szobi andezit szobi andezit szobi andezit Duna-homok Duna-homok Duna-homok
13	F_1 (6,74)	Ugyanaz, mint 9–12, csak a 12,6% 0–1 mm-es Duna-homokot 0,7–0,85 mm-es 1. j. korunddal helyettesítettük.	
14	F_2 (6,50)	Ugyanaz, mint 9–12, csak a 12,6% 0–1 mm-es Duna-homokot 0,18–0,20 mm-es 2. j. korunddal helyettesítettük.	
15	G_1 (5,70)	25,5% NZ 20/40 14,4% NZ 12/22 17,5% NZ 5/12 7,0% 3–5 mm-es 10,0% 1–3 mm-es 26,0% 0,7–0,85 mm	szobi andezit szobi andezit szobi andezit Duna-homok Duna-homok korund (1. j.)
16	G_2 (5,18)	Ugyanaz, mint 15, csak a 26% korund helyett 0–1 mm-es Duna-homokot adagoltunk.	
17	G_3 (5,22)	Ugyanaz, mint 15, csak a 26% korundot helyettesítettünk	
		13% 0–1 mm-es 13% 0,18–0,21 mm-es	Duna-homokkal korunddal (2. j.)
18	H (5,02)	27% 15–25 mm-es 24% 7–15 mm-es 11% 3–7 mm-es 12% 1–3 mm-es 13% 0–1 mm-es 13% 0,18–0,21 mm-es	kavics, dunai kavics, dunai kavics dunai Duna-homok Duna-homok korund (2. j.)
19	I (5,62)	29% 15–25 mm-es 23% 7–15 mm-es 16% 3–7 mm-es 32% 0,1–3 mm-es	kavics, felsőzsolcai kavics, felsőzsolcai kavics, felsőzsolcai homok
20	I (5,39)	Ugyanaz, mint 19, csak a 32% 0,1–3 mm-es homokból 11%-ot 0,18–0,21 mm-es 2. j. korunddal helyettesítettünk.	

Megjegyzés: Zárójelben a finomsági modulusok.

A kísérleti betonokat kézi erővel kevertük meg, és 3000 ford/perc rezgésszámú tűvibrátorral tömörítettük. A próbatesteket elkészítésük után 7 napon át nedvesen tartottuk.

Megállapítottuk a frissbeton-konzisztencia mérőszámát Glanville-féle készülékkel (tömörödési szám) és Abrams-féle csonkakúppal (*25.9. táblázat*).

25.9. táblázat. A friss beton konzisztencia-mérőszámai, a beton testsűrűsége és 28 napos kockaszilárdsága (5-5 kocka) [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

Kísérlet jele	Kúproskadás cm	Tömörödési szám	Kockaszilárdság MPa	Testsűrűség töréskor kg/m³
1	–	0,710	43,3 *b*	2550
2	–	0,644	44,9 *b*	2510
3	–	0,71	52,3 *b*	2560
4	–	0,696	58,6 *b*	2540
5	–	0,672	48,7 *b*	2510
6	–	0,745	54,1 *b–k*	2450
7	0,60	0,745	44,2 *a*	2480
8	0,60	0,698	48,4 *a*	2440
9	0,60	0,688	49,3 *a*	2450
10	–	0,715	50,4 *a*	2470
11	0,60	0,718	50,8 *a*	2420
12	0,60	0,693	53,3 *a*	2440
13	1,10	0,720	52,5 *a*	2500
14	–	0,688	57,7 *a*	2530
15	0,75	0,710	56,1 *a*	2550
16	–	0,720	49,6 *a*	2380
17	0,25	0,682	43,6 *a*	2450
18	0,60	0,735	49,3 *k*	2440
19	1,50	0,812	37,5 *k*	2390
20	1,10	0,742	41,8 *k*	2450

25.3.3.4. A kísérleti betonok 28 napos kockaszilárdsága

A 28 napos korú beton átlagos kockaszilárdságát a *25.9. táblázat* mutatja. Ugyanebben a táblázatban adtuk meg a beton testsűrűségét, közvetlenül a szilárdsági vizsgálat előtt mérve.

A szilárdság értékeléséhez megjegyezzük, hogy a konzisztencia-mérőszámokat igyekeztünk azonosra beállítani.

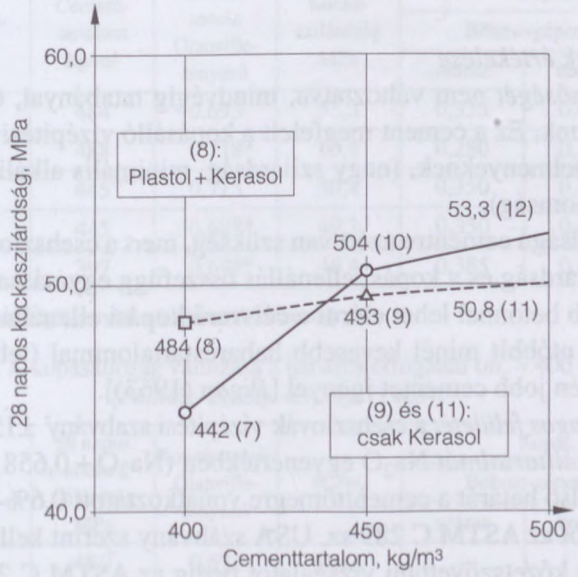
Mind a bazalttal, mind az andezittel, mind a homokos kaviccsal készített betonok 28 napos szilárdsága nagyobb volt 40 MPa-nál, már 400kg/m^3 cementtartalommal is. (Kivételt csak a 19. jelű kísérlet során készített, képlékenyebb beton képezett, melynek tömörödési száma: 0,812.)

A cementtartalom változásának hatását csak a 7–12. jelű kísérleteknél lehet ellenőrizni. A cementtartalmat 400-ról 500 kg/m^3-re növelve nőtt a betonszilárdság (*25.10. ábra*).

Kerasol légpórusképzővel mindig csökkent a kockaszilárdság (kb. 5%-kal). Ez megfelel a várt szilárdságcsökkenésnek.

A bazalt adalékanyagú beton szilárdsága nőtt az adalékanyag legnagyobb szemnagyságának növelésével, a növekmény kb. az Abrams-féle finomsági modulus növekedésével volt arányos. A 6. jelű kísérlettel (legnagyobb szemnagyság 40 mm), amelyet 40 × 40 cm méretű tömbökből fűrészeltünk ki 7,07 × 7,07 cm élhosszúságú kockákat, a *Duna*-vizsgálathoz pedig 40 × 40 × 12 cm méretű lapokat. (A lapok egyik oldalát gyalulatlan deszkával zsaluztuk, mint az építés során.)

A 40 × 40 cm méretű lapokat úgy helyeztük el, hogy mindig a *fazsaluzattal kialakított oldallapon jelentkezzék a koptatóhatás.* A Duna-módszerrel 3–3 párhuzamos koptatóvizsgálatot, a *Böhme*-módszerrel kettőt-kettőt (száraz, illetve nedves) végeztünk. *Duna*-módszerrel vizsgálva a kopás nem lesz egyenletes, ennek ellenére a kopás mértékét a teljes felületre vonatkoztatott cm^3-ben szokás megadni. A továbbiakban 3–3 db átlagát tüntetjük fel.



25.10. ábra. A 28 napos beton nyomószilárdság és a cementtartalom közötti összefüggés betonjavító vegyszerekkel és anélkül. (A szilárdsági értékek után zárójelben a kísérletek sorszámai szerepelnek.) [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

Az értékelés során a habarcs mennyiségét

$$V_h = 1000 - \frac{m_a}{\rho_a}$$

képletből számítottuk. A képletben m_a a durva adalékanyag tömege a beton m^3-enként ($d > 5$ mm), ρ_a a durva adalék sűrűsége, melyet egységesen 2,65-re vettünk fel.

25.3.3.5. A beton kopásállósága

a) A vizsgálati módszerek

A kopási vizsgálatot egyrészt az MSZ 1991:1967 szabvány szerinti Böhme-módszerrel, másrészt Duna-módszerrel végeztük.

A 19. és 20. jelű kísérleteknél, a nagyobb folyósság miatt, csökkent a szilárdság. *Andezit adalékanyaggal* nem lehetett az adalékanyag legnagyobb szemnagyságának hatását határozottan kimutatni.

A 13. és 15. jelű kísérletek során az adalékanyagból hiányzott a 700 μm-nál, a 14. és 16. jelű kísérletekben a 180 μ-nál finomabb rész. Ezeknek a betonoknak a szilárdsága nagyobb lett, mint a velük összehasonlítható, de finom részt is tartalmazó betonoké. Ez a kísérlet is alátámasztja azt a szakirodalomban említett tapasztalatot, hogy *nyomószilárdság szempontjából kedvezőtlenek a 100 μ-nál kisebb adalékanyagszemek.*

b) Az eredmények értékelése

1. *A cement minőségét* nem változtatva, mindvégig tatabányai, 600-as portlandcementtel dolgoztunk. Ez a cement megfelelt a kopásálló vízépítési betonnal szemben támasztott követelményeknek, (nagy szilárdság, minimális alkálitartalom és szabályozott őrlési finomság).

A nagyszilárdságú cementre azért van szükség, mert a csehszlovák kísérletek szerint a nyomószilárdság és a kopási ellenállás összefügg egymással és általában csak B 400-asnál jobb betonnal lehet elérni a célszerű kopási ellenállást. A lengyel szabvány szerint az utóbbit minél kevesebb habarcstartalommal (tehát cementtel) kell elérni, ami szintén jobb cementet igényel [*Rigan* (1963)].

A *cement fajlagos felületét* a csehszlovák vízépítési szabvány ±15% tűréssel írta elő.

A *cement alkálitartalmát* Na_2O egyenértékben ($Na_2O + 0{,}658\ K_2O$) szokás kifejezni, s annak felső határát a cementtömegre vonatkoztatott 0,6%-ban kötik meg. Az esetleges reakciót az ASTM C 289 sz. USA szabvány szerint kell kimutatni habarcs próbatesteken, a kőzetszövettani vizsgálatot pedig az ASTM C 295 írja le [*Uaddal* (1963)].

A kísérlethez használt tatabányai 600-as cement alkálitartalom szempontjából megfelelő volt.

2. A *cementtartalom változtatásának hatását* tulajdonképpen a *habarcs minőségének* változásán lehet lemérni, de eközben a habarcs összmennyiségét állandó értéken kell tartani. Erre nézve útbaigazítást a *25.10. táblázat* ad. *Nagyjából azonos habarcstartalom,* konzisztencia és teljesen azonos homok, illetve andezit-adalékanyag esetén a jobb habarcs miatt nő a Duna-kopásállóság, s egyúttal a kockaszilárdság is nő.

3. *Azonos cementtartalom, de növekvő mennyiségű homok* ($d < 5$ mm) esetén a beton habarcstérfogata nő, egyúttal minősége is romlik, ezért a Duna-kopási értékek növekednek (*25.11. táblázat*), de a változás nem olyan erőteljes, mint a habarcs minőségének változtatása esetén.

4. Külön kísérleti változóként nem vettük fel *azonos minőségű, de növekvő térfogatú habarcstartalom* hatásának vizsgálatát, azonban a korundos adalékanyaggal (lásd később) készült betonok adataiból és a fenti *c)* alattiakból is egyaránt úgy látszik, hogy a *habarcs minősége nagyobb súllyal szerepel,* mint térfogathányada, legalábbis az általunk vizsgált kísérleti tartományban.

5. Nagyjából azonos cementtartalom és homokmennyiség, azaz habarcsminőség és habarcstérfogat esetén a *durva adalékanyag fajtája* döntően meghatározza a kopásállóságot: *e szempontból legjobb a folyami kavics, kevésbé jó a bazalt, még kevésbé az andezit* (*25.12. táblázat*).

25.10. táblázat. A kopásállóság változása a habarcs minőségével (Sorrend: Duna-módszer alapján) [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

Kísérlet jele	Habarcs-térf. %	Cement-tartalom kg/m³	Konzisz-tencia Glanville-tényező	Kocka-szilárdság MPa	Kopás, cm³/cm²		
					Böhme-gépen		Duna-módszerrel
					száraz	nedves	
12	54,1	484	0,693	53,3	0,335	0,430	0,38
11	53,2	488	0,718*	50,8	0,280	0,310	0,40
10	52,0	445	0,715	50,4	0,350	0,410	0,40
9	51,5	445	0,688*	49,3	0,350	0,420	0,44
8	50,0	397	0,698*	48,4	0,385	0,460	0,45

A *-gal jelölt keverékekben képlékenyítő adalékszerek is vannak.

25.11. táblázat. A kopásállóság változása a habarcstérfogattal ($m_c = 400$ kg/m³ esetén) [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

Kísérlet jele	Habarcs-térf.%	28 napos kocka-szilárdság MPa	Konzisztencia Glanville-tényező	m_w/m_c	Kopás, cm³/cm²		
					Böhme-gépen		Duna-módszerrel
					száraz	nedves	
5	61,0	48,7	0,672	0,42	–	–	0,37
1	53,0	43,3	0,708	0,39	0,325	0,350	0,36
8	48,2	52,3	0,710	0,44	0,300	0,350	0,35

25.12. táblázat. A durva adalékfajta hatása (víz-cement tényező) [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

Kísérlet jele*	Cement-tartalom kg/m³	Habarcs-térfogat %	Durva adalék-anyag	d_{max} mm	Kocka-szilárdság MPa	Kopás cm³/cm²		
						Böhme gépen		Duna-módszer
						száraz	nedves	
19 (*I*)	391	59,2	kavics	25	37,5	0,220	0,260	0,27
6 (*D*)	400	59,0	kavics	40	54,1	0,360	0,375	0,29
5 (*C*)	400	61,0	bazalt	65	48,7	–	–	0,37
16 (G_2)	386	61,3	andezit	40	49,6	0,355	0,360	0,42
7 (*E*)	396	60,0	andezit	65	44,2	0,360	0,440	0,43

*()jelben a szemszerkezet jele, lásd 25.8. sz. táblázat

A fenti adatok egyik érdekessége, hogy a kopásállóság különböző durva adalékanyagok összehasonlítása esetén csak lazán függ a nyomószilárdságtól, és a leginkább kopásálló (mesterséges adalékanyag nélküli beton a bemutatott sorozatban éppen a legkisebb nyomószilárdságú.

Megjegyezzük, hogy a fenti esetekben a víz-cement tényező 0,42–0,45 közt változott csak, gyakorlatilag tekintve konstans volt. A *Glanville*-féle tömörödési tényező a gömbölyű szemű kavics adalékanyagnál volt a legnagyobb (0,812–0,745), az éles és nagy szemű bazaltnál a legkisebb (0,672), az andezetibetonoknál ismét nagyobb (0,720–0,745).

A megegyező betontechnológiai jellemzők mellett viszont különbség volt a szemszerkezetben és a finomsági modulusban is.

Úgy véljük, hogy a *durva adalékanyag fajtája* (minősége) az, amely a *25.12. táblázatban* felvett változók esetén a kopásállóságot elsősorban befolyásolja.

6. Ha a Duna-kopási szám alapján sorba rendezzük eredményeinket, akkor megállapíthatjuk, hogy *bármelyik kísérleti andezitbeton,* természetes finom adalékanyagot (nem korund) feltételezve. (A 4, 3, 2, 1 jelű bazaltbetonok kopása 0,35–0,37 cm³/cm², míg a 12, 11, 10, 16, 7, 9 és 8 jelű andezitbetonok 0,38–0,45 cm³/cm².)

25.13. táblázat. A kopásállóság változása a korundtartalommal ($m_c = 450$ kg/m³, $d_{max} = 65$ mm) [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

Kísérlet jele	Korund jele	Korund % összes adalékanyagra	28 napos szilárdság MPa	Kopás cm³/cm²		
				Böhme-gépen		Duna-módszer
				száraz	nedves	
10	–	–	50,4	3,50	4,10	0,40
13	1	12,6	52,5	2,30	2,80	0,26
14	2	12,6	57,7	2,05	2,65	0,25

7. *A kopást jelentékenyen csökkenti a kemény mesterséges finom adalékanyag* (korund). A *25.13. táblázat* szerint azonos homoktartalom és kb. azonos cementadagolás, vagyis azonos habarcstartalom és minőség, továbbá egységesen $d_{max} = 65$ mm legnagyobb szemnagyságú andezit durva adalékanyag esetén a kopásállóság lényegesen javul, ha a finom homok ($d < 1$ mm) egy részét korunddal helyettesítjük.

A korundtartalom növelésének hatását a *25.14. táblázat* mutatja be. Az egész sorozat legkisebb Duna-kopásértékét – 0,24 cm^3/cm^2-t – akkor kaptuk, amikor az adalékanyag 26% mennyiségű 1 mm alatti részét korundhomokkal helyettesítettük. Minthogy az *1.* jelű korundhomok 0,70–0,85 mm szemnagyságú, ebben a betonban egyáltalán nem maradt 0,70 mm-nél kisebb adalékanyag, illetve nem maradt 1 mm alatti természetes homok. A finom adalékanyagrészek tehát kedvezőtlenek a kopás szempontjából.

8. A finom adalékanyagrészek szerepét a *25.15. táblázat* világítja meg. Ahhoz azonban nem elegendő ez a 20-as kísérletsorozat, hogy minden kérdést tisztázzon.

A táblázat a kísérletsorozat legjobb 8 kopásálló betonját tartalmazza, a Duna-kopási számok szerint rendezve. Ezek közül 6 korund adalékos, 1 homokos kavicsból, *1* pedig zalahalápi bazaltból és folyami kavicsból készült. A legjobb az a beton (*15.* jelű), amely a habarccsal legtöbb korundot tartalmazta. A *14.* és *13.* jelű andezitbeton – a durva adalékanyagfajta silányabb minősége ellenére – szintén igen jó: egyrészt, mert 1,0 mm alatt szintén csak korundot tartalmaz, másrészt, mert a habarcsok minősége lényegesen jobb, mint a többi. (Ez egyébként a jó *Böhme*-számokban is megnyilvánul.) A *19* és a *6.* jelű betonok korundot ugyan nem tartalmaznak, de adalékanyaguk a legkopásállóbb adalékanyag és a 0,1 mm alatti frakció csak csekély részét képviseli az adalékanyagnak. Kísérleti munkának véljük, hogy a *18.* és *17.* jelű, korundadalékos betonok – elsősorban a *18.* jelű kavicsbeton – a vártnál jobban kopnak, különösen, ha összevetjük az *50.* jelű hasonló minőségű és mennyiségű finom adalékanyagot tartalmazó mintával.

Megjegyezzük, hogy – véleményünk szerint – gyengébb minőségű, olcsóbb korunddal is jelentősen lehet a kopást csökkenteni.

A kísérlet során a használt képlékenyítő anyagoknak a kopásállóságra gyakorolt hatását nem sikerült kimutatni.

25.14. táblázat. A kopásállóság változása a korundtartalommal ($m_c = 400$ kg/m³, $d_{max} = 40$ mm) [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

Kísérlet jele	Korund jele	Korund % összes adalékanyagra	28 napos szilárdság MPa	Kopás cm^3/cm^2		
				Böhme-gépen		Duna-módszer
				száraz	nedves	
15	1	26	56,1	1,80	2,05	0,24
16	2	13	43,6	3,05	3,20	0,33
17	–	–	49,6	3,55	3,60	0,42

25.15. táblázat. A finomrészek és a korund szerepe a kopásállóságban [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

Kísérlet jele*	Finom részek tömeg%-a d, mm				$f_{c,\,cube}$ MPa	Cement-tartalom kg/adalék jele	Kopás, cm³/cm²		
	0,1–0,24	0,24–1,00	1,00–5,00	össz. 5 alatt			Böhme-gépen		Duna-módszerrel
							száraz	nedves	
15 (*G*)	–	26 ko–1	17 H	42	56,1	415/*A*	0,180	0,205	0,24
21 (*I*)	13 ko–2	11	18,5	42,5	41,8	400/*K*	0,235	0,260	0,25
14 (F_2)	13 ko–2	–	15	28	57,7	462/*A*	0,205	0,265	0,25
13 (F_1)	–	13 ko–2	15	15	52,5	462/*A*	0,230	0,280	0,26
19 (*I*)	2	16	23,5	41,5	37,5	391/*K*	0,220	0,260	0,27
6* (*I*)	5	14	21	40	54,1	400/*K*	0,360	0,375	0,29
18 (*H*)	13 ko–2	13	17	43	49,3	400/*K*	–	–	0,32
17 (G_3)	13 ko–2	13	19	45	43,6	400/*A*	0,305	0,320	0,33

Megjegyzések: * = vegyes (kavics; bazalt) adalék, ko = korund és jele, *K* = kavics, *A* = andezit.

25.3.3.6. A beton fagyállósága

A fagyállósági vizsgálatot az MSZ 4715:1961 szabvány szerint, betonfajtánként 4-4 db, közel kocka alakú, kb. 10 cm élhosszúságú *betontömbből kifűrészelt próbatesten* végeztük el.

A fagyasztás okozta nyomószilárdság-csökkenés szemléltetésére a *25.16. táblázatban* összefoglaltuk a beton 28 napos kockaszilárdságát, a 150-szeres fagyasztás után megállapított nyomószilárdságot, a beton vízfelvételét és a két nyomószilárdság viszonyát, az ún. *fagylágyulási tényezőt (f)*

$$f = \frac{f_{150}}{f_{28}}$$

Jelölés: f fagylágyulási tényező,
f_{150} 150-szer fagyasztott beton nyomószilárdsága,
f_{28} 28 napos, szabványosan szilárduló beton nyomószilárdsága.

A fagyasztott kockák értékelése során figyelembe kell venni, hogy a fűrészelés is okozhatott nem látható repedéseket, továbbá a 150-szeres ki- és berakás során, a romló betonon esetleg keletkező ütődések is befolyásolhatják a nyomószilárdsági eredményeket, és így nagyobb volt a szórás is, mint a sablonban készített próbates-

tek esetében. E bizonytalanságok hangsúlyozása mellett a *25.16. táblázat* alapján az alábbi következtetéseket vontuk le.

a) A fagylágyulási tényező egyik jellemzője a beton fagyállóságának. Hazánkban 150-szeres fagyasztást e kísérletek során végeztek először, és ez – éghajlati viszonyaink figyelembevételével – (erre szabályzati előírásunk nincs) mindenesetre felső határkövetelménynek tekintendő. A legjobb 2, 19, 6, 16, 1 és 4 jelű betonok csak az $f = 0{,}65$ határt haladják meg egyértelműen (szemben például a cseh szabványban), de a két legjobb betonnál $f \geq 0{,}75$. Készíthető tehát *különleges betontechnológiai módszerek nélkül is,* 150 ciklusra is fagyállónak nevezhető beton. Ugyanakkor azonban a B 500-nál nagyobb szilárdságú, $d_{max} = 65$ mm szemnagyságú *jó* andezitbetonok fagyállósága kétséges: $f = 0{,}49$–$0{,}55$ (10, 11 és 12 jelű). (Az MSZ 4720:1961 szerint $f = \geq 0{,}9$ legyen, az új tervezet szerint $f \geq 0{,}75$.)

b) A durva adalékanyag minősége. A folyami kavics kiváló és a bazalt jó fagyállósága meglátszik a belőlük készített betonokon is, ugyanis a *legjobb négy beton kvarckavics- vagy bazaltadalékanyagos,* de jó a 16, 8 és 9 jelű andezitbeton is –

25.16. táblázat. A fagyasztás hatása a nyomószilárdságra [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

Kísérlet jele	Nyomószilárdság, MPa			Sorrend f szerint	Vízfelvétel %
	f_{28}	f_{150}	$f = \frac{f_{150}}{f_{28}}$		
1	43,3	28,9	0,67	4	5,41
2	44,9	44,0	0,98	1 (*PK*)	4,22
3	52,3	26,6	0,51	14	4,44
4	58,6	37,6	0,64	7 (*PK*)	3,59
6	54,1	37,1	0,69	3	4,59
7	44,2	27,0	0,61	11	5,98
8	48,4	31,4	0,65	6 (*PK*)	6,00
9	49,3	31,7	0,64	9 (*K*)	5,69
10	50,4	24,6	0,49	16	5,57
11	50,8	25,6	0,51	15 (*K*)	5,47
12	53,3	29,2*	0,55	13	6,35
13	52,5	20,2	0,38	18	5,55
14	57,7	35,3	0,61	10	5,55
15	56,1	25,4	0,45	17	5,70
16	49,6	32,6	0,66	5	6,11
17	43,6	28,2	0,65	7	6,05
19	37,5	32,7	0,87	2	5,01
20	41,8	23,5	0,56	12	5,15

Megjegyzés: * = csak 100-szoros fagyasztás. Zárójelben: *P* = Plastol, *K* = Kerasol

vagyis $f = 0{,}65$ körüli fagyállóságot andezittel is el lehet érni, szükség esetén. A kvarckavicsbeton fagyállósága meggyőzőbbnek látszik, mert adalékszer nélkül is kb. 0,7 fölött volt.

c) A finom adalékanyag minősége. A 6 és 19 jelű, igen fagyálló kavicsbetonok alapján azt mondhatjuk, hogy ezek mérsékelt finom homok- ($d < 1$ mm), valamint csekély 0,24 mm alatti homokliszttartalma (vö. a *25.15. táblázat*) és fagyállósága esetleg összefügghet egymással, ugyanakkor ezzel nem magyarázható meg a korundos (finom részeket alig tartalmazó) betonok gyengébb fagyállósága (12, 14, 15, 17 és 20 jelű) – hacsak nem a korund és a cementhabarcs hőkiterjedési összeférhetetlenségével.

d) Adalékszerek hatása. A Plastol + Kerasol használatával készített betonok (2, 4 és 8 jelű) jók. A Kerasol a 9 jelű betonnál önmagában is hatásos volt, a 11 jelűnél viszont 50 ciklus után kézzel szétszedhető próbatestet kaptunk, tehát további kísérlet nélkül *önmagában nem javasoljuk használatát.*

e) Vízfelvétele alapján a kőzetet akkor tekintjük fagyállónak, ha az 0,5 tömeg%-nál kisebb. A felhasznált adalékanyagok közül e kívánalmaknak csak a folyami kavics felel meg.

A *26.16. táblázat* szerinti, három legkisebb vízfelvételű beton (2, 4 és 6) egyúttal leginkább fagyállóak közé is tartozik, ugyanakkor a 3. jelű beton majdnem a sorozat legrosszabbja, pedig ugyanolyan csekély a vízfelvétele.

A beton vízfelvétele alapján tehát fagyállósági minőségi sorrend nem állítható fel.

25.3.3.7. A kísérleti beton vízzárósága

A kísérlet során 2–2 db (*a* és *b* jelű) $20 \times 20 \times 12$ cm méretű próbatestet készítettünk, s ezeket 28–90 napos korukban az MSZ 4719:1958 szabvány szerint vízzáróságra vizsgáltuk. A víznyomás 48 órán át 1 att, a következő 24 órán át 3 att, további 24 órán át 7 att, végül 24 órán át 10 att volt. A kísérlet befejeztével megállapítottuk a vízbehatolás mélységét. A kísérleti eredményeket a *25.17. táblázat* foglalja össze.

A fagyállósági és vízzárósági minőségi sorrendet egybevetve megállapíthatjuk, hogy a 6–6 legjobb beton közül 4 betonfajta mindkét szempontból együttesen jó (1, 2, 16 és 19 jelű beton) és ezek egyúttal elsőrangú kopásálló betonok (MSZ 4719:1958).

25.3.3.8. A betonalkotók összeférhetősége

A bevezetőben utaltunk arra, hogy az időjárás folytonos változása mintegy *klimatikus fárasztásra* veszi a betont igénybe. Ez abban nyilvánul meg, hogy a beton hőmérséklete és nedvességtartalma (azaz különböző alkotóinak hőmérséklete és nedvességtartalma) mind időben, mind térben változik, s így még akkor is keletkeznének az egyenlőtlen hőkiterjedés, illetve zsugorodás következtében belső feszültségek, ha a beton

25.17. táblázat. Vízbehatolás 10 att víznyomás hatására [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

Kísérlet jele* (minőségi sorrend)	Behatolás cm		Megjegyzés
	a	b	
1 (2)	8,5	9,0	–
2 (1)	8,0	7,0	–
3 (9)	11,0	10,0	–
4 (9)	11,0	10,5	–
5 (12)	12,0	12,0	10 att-ra átnedvesedett, de nem folyt át.
6 (16)	12,0	12,0	3 att-ra átnedvesedett, 10 att-ra 0,3 liter átfolyt.
7 (11)	12,0	12,0	7 att-ra átnedvesedett, de később sem volt mérhető.
8 (15)	12,0	10,0	*a)* 7 att-ra átnedvesedett, de nem folyt később sem.
9 (16)	12,0	12,0	3 att-ra átnedvesedett, 10 att-ra 0,2 liter átfolyt.
10 (15)	12,0	12,0	7 att-ra átnedvesedett, de később sem volt mérhető.
11 (13)	12,0	12,0	*a)* és *b)* 7 att-ra átnedvesedett, de később sem volt mérhető.
12 (7)	10,0	11,0	–
13 (14)	12,0	12,0	10 att-ra gyöngyözni kezdett.
14 (9)	11,0	11,0	–
15 (4)	9,0	9,0	–
16 (5)	11,0	6,0	–
17 (10)	12,0	11,0	*a)* 3 att-ra kezdett átnedvesedni, de később sem volt mérhető
18 (8)	7,0	12,0	*b)* 7 att-ra átnedvesedett de később sem volt mérhető.
19 (6)	9,0	11,0	–
20 (3)	8,0	10,0	–

* Az első oszlopban zárójelben a minőségi sorrend 1-től 16-ig

homogén volna. Tekintve, hogy a beton nem homogén, még egész tömegében azonos hőmérsékletű, illetve azonos nedvességtartalmú betonban is vannak feszültségek, illetve keletkeznek repedések, ami által a beton időállósága, fagyállósága kérdésessé válik.

Elsősorban a szakirodalomra, részben pedig kísérleteinkre támaszkodva rámutatunk arra, milyen tényezők játszanak itt szerepet. Úgy véljük, hogy a különböző fajtájú adalékanyagok *együttes* alkalmazása gondos előtanulmányozást igényel.

a) Lineáris hőtágulási együttható

Ennek értékei a következők:

beton	$10 \cdot 10^{-6}$/ °C
gránit	$8 \cdot 10^{-6}$/ °C
kvarc	$14 \cdot 10^{-6}$/ °C
dácit	$9{,}3 \cdot 10^{-6}$/ °C
andezit	$10 \cdot 10^{-6}$/ °C

Az andezit és a dácit hőkiterjedési együtthatójára kézikönyvekben nem találtunk adatokat, ezért azt –25 °C és +110 °C közt, többszörös hűtés és felmelegítés során megmértük [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]. Az átlagos végeredményeket 6-féle andezitre és egy dácitra közöltük. A mérést két szakaszban végeztük: –25 °C és +25 °C, illetve +25 °C és +110 °C között. Tapasztalataink szerint a kisebb hőmérsékleti zónában α értéke nagyobb, mint –25 °C fölött, továbbá e különbség az első hűtési-melegítési ciklusban nagyobb, mint többszöri ismétlés után A fagyban való tönkremenetel érdekes és kevéssé vizsgált területe, hogy a beton habarcsrészének, illetve a durva adalékanyagoknak lineáris hőtágulási együtthatója (α) *hogyan változik és egymástól mennyire különbözik* fagyás-felengedés során (–20 °C + 5 °C). Annyi az átlagértékek alapján is megállapítható, hogy ha kvarc és andezit (vagy dácit) durva adalékanyagot együttesen használunk, hőfeszültség ébred az eltérő hőtágulási együtthatók miatt. (A különbség, pedig még nő is amiatt, hogy vízzel telített állapotban kisebb a hőtágulási együttható, tehát az andezité csökken, s mert a kvarc nem vesz fel vizet, azé változatlan [*Palotás* (1959)].

b) A nedvességtartalom okozta hosszváltozások

Snowdon és *Edwards* (1962) több éves, kiterjedt kísérletekkel vizsgálták néhány gyakori skóciai adalékanyagkőzet hidrotechnikai tulajdonságait. A vizsgált doleriteket, mészköveket, gránitot, trachitot, felzitet stb. nem zsugorodó, közepesen, illetve erősen zsugorodó csoportba osztották be. A különböző adalékanyagú betonok, illetve az alapkőzet zsugorodása között a következő összefüggést állapították meg:

$$\varepsilon_{\text{beton, zs}}‰ = 0{,}3‰ + \varepsilon_{\text{kőzet, zs}}‰$$

A zsugorodó, illetve nem zsugorodó finom és durva adalékok kombinációiból készített betonok zsugorodását és az időjárási fárasztás után megállapítható károsodási indexet a *25.18. táblázat* tartalmazza. (Finom, zsugorodó adalékanyag: a kérdéses zsugorodó kőzetekből zúzott homok.) A kísérlet során a cement : homok : kavics arány 1:2:4 volt, a víz-cement tényezőt 0,6-ra választották.

A táblázatból két fontos következtetés vonható le: A *zsugorodás mértékét* döntően a durva adalékanyag zsugorodása befolyásolja (0,75–0,96).

A *károsodás mértéke* azonban a durva adalékanyag és a habarcs zsugorodása közti *különbségtől* függ:

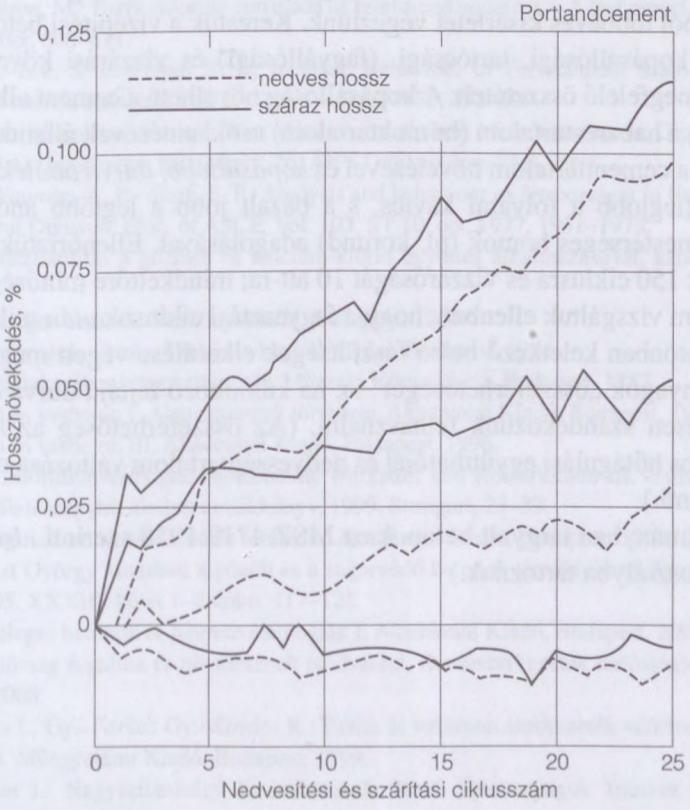
$$\Delta\varepsilon_{zs} = \varepsilon_{\text{habarcs}} - \varepsilon_{\text{kavics}}$$

Tekintve, hogy a habarcs zsugorodása mindig nagyobb, mint a betoné, a $\Delta\varepsilon_{zs}$ szélső értéket zsugorodó homok és nem zsugorodó kavics esetén vesz fel, de nagy a különbség (és nagy a károsodás is), ha mindkét adalékanyagrész zsugorodó. A károsodás csökkenthető – az időállóság javítható – ha nem zsugorodó finom adalékanyagot használunk.

25.18. táblázat. Különféle adalékanyaggal készített betonok zsugorodása [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

Durva adalékanyag	Finom adalékanyag	ε_{zs}, ‰	Károsodási index
nem zs	nem zs	0,25	0
nem zs	zs	0,34	66
zs	nem zs	0,76	13
zs	zs	0,95	61

Bár az időállóságot *közvetlenül* kevéssé befolyásolja, mégis fontos a durva adalékanyag *saját zsugorodása* is, egyrészt mert *ez dönti el a beton zsugorodásának mértékét,* ami szerkezeti és építési szempontból fontos; másrészt, mert a *váltakozó kiszáradás és átnedvesedés egyre halmozódó hossznövekedést okoz, ha az adalék zsugorodó.* A *25.11. ábra* szerint portlandcementtel készült betonok hossza a száradás-átnedvesedési ciklusszám növekedésével folytonosan növekszik. Ez a jelenség



25.11. ábra. Különböző minőségű adalékanyagból készített betonok hosszváltozása, ismételt víztelítés-szárítás hatására [*Palotás–Balázs–Erdélyi* (1965)]

különleges kérdéseket vet fel, amelyek nem képezhetik e tanulmány tárgyát. *Showdon* és *Edwards* (1962) általánosságban így adja meg a beton időjárásállóságát befolyásoló tényezőket:

– a habarcs nyúlóképessége a légtartalommal nő;
– a nagyobb *E*-modulusú (kvarc, gránit) adalékanyagból készített beton kiterjedtebben repedezik, mint a puhább (pl. mészkő) adalékos;
– a repedések kisebbek, ha az adalékanyag nem éles szélű;
– a repedések $d_{max} = 40$ mm esetén kb. négyszer akkorák, mint 20 mm esetén;
– a már említett $\Delta\varepsilon_{zs}$ értékén kívül a repedési képet a próbatestben kialakuló hő- és nedvességtartalom-megoszlás, továbbá az adalékok és a habarcs hő- és nedvességkiterjedési együtthatójának különbözősége is befolyásolja.

25.3.3.9. Összefoglalás

A vízépítési betonok területén felmerülő igények fokozott kielégítésére a VÍZITERV megbízásából többéves kísérletet végeztünk. Kerestük a vízépítési betonnal szemben támasztott kopásállósági, tartóssági, (fagyállósági) és vízzárási követelményeknek legjobban megfelelő összetételt. A kopásállóság növelhető a cement alkalmas megválasztásával, a habarcstartalom (homoktartalom) csökkentésével, állandó habarcstartalom esetén a cementtartalom növelésével és *kopásállóbb, durva adalékanyag felhasználásával* (legjobb a folyami kavics, s a bazalt jobb a legtöbb andezitnél, végül kopásálló mesterséges homok (pl. korund) adagolásával. Ellenőriztük a betonok fagyállóságát 150 ciklusra és vízzáróságát 10 att-ra; mindkettőre minőségi rangsort adhatunk. Nem vizsgáltuk ellenben, hogy a fagyasztási ciklusok *után* milyen a kopásállóság. A betonban keletkező belső feszültségek elkerülése végett meg kell vizsgálni az adalékanyagok „összeférhetőségét" is, ha különböző fajtájú durva adalékanyagokat együttesen szándékozunk felhasználni. (Az összeférhetőség az adalékanyagok közel azonos hőtágulási együtthatóját és nedvességtartalom változása okozta alakváltozását jelenti.)

(A tanulmányban tárgyalt betonok az MSZ 4719:1958 szerinti *elsőrangú kopásálló beton* osztályba tartoznak.)

Irodalom

Abrams, D. A.: Design of concrete mixtures. Bulletin No. I. Structural Materials Research Laboratory, Chicago, 1918.

ACI 201 Committee: Vízépítési létesítmények betonjának kopásállósága. Journal of the ACI, 1955. nov. 259.

Almási J.: Vízzárás biztosítása vasbetonnal a Lurdy-ház alapozásánál. Vasbetonépítés, 2004, 4. szám 112–117.

Arber, M. G.–*Vivian*, H. S.: Inhibition of the corrosion of steel embedded im mortar, Australian Journal of Applied Science, 1960.

Atimtay, E.–*Ferguson*, M.: Early chloride corrosion of reinforced concrete. – A test report. ACI Journal, 1973, September, 606–611.

Austriacio, N. C.–*Lee*, S. L.–*Pama*, R. P.: Inelastic Behaviour of Ferrocement Slabs in Bending. Magazine of Concrete research. Vol. 27., No. 93. Dec. 1975, 193–209.

Bachmann Z.: Pécs középkora. A pécsi Dóm Múzeum román kori kőtár bemutatása. Gipszbeton szerkezetek. Alkalmazástechnikai Kézikönyv. 26. ÁÉV Dunaújváros-ÉMI, 1991.

Balaguru, P. N.–*Naaman*, A. E.–*Shah*, S. P.: Analysis and behaviour of ferrocement in flexure. Journal of the Structural Division. Proc. of ASCE, Vol. 103. ST 10. oct. 1977, 1951–1973.

Balázs Gy.: Betonszilárdítás a gőzölés és kalcium-klorid együttes alkalmazásával, kandidátusi értekezés, 1963.

Balázs Gy.: Különleges betonok. Tankönyvkiadó, Budapest, 1968.

Balázs Gy.: Építőanyagok, kémia. Tankönyvkiadó Vállalat, Budapest, 1984.

Balázs Gy.: Energiatakarékos betonszilárdítás. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987.

Balázs Gy.: Beton és vasbeton I. Alapismeretek története. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1994.

Balázs Gy.: Beton és vasbeton III. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1996.

Balázs Gy.: Das Chloridionvermögen der Zemente Werkstoff und Konstruktion III. Gallus Rehm professzor 75. születésnapjára kiadott emlékkönyv, 1999. Stuttgart, 25–33.

Balázs Gy.: Barangolásaim a betonkutatás területén. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2001.

Balázs Gy.: Kunszt György kutatásai a gőzölt és a sugárvédő betonok témakörében. Építés-Építészettudomány 2005. XXXIII. kötet 1–2 szám. 117–122.

Balázs Gy.: Különleges betonok és betontechnológiák I. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2007.

Balázs Gy.: A tartósság fogalma és növelésének módszerei. Betonszerkezetek tartóssága c. konferenciakiadvány, 2008.

Balázs Gy.–*Balázs* L. Gy.–*Farkas* Gy.–*Kovács* K.: Beton és vasbeton szerkezetek védelme, javítása és megerősítése I. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1999.

Balázs Gy.–*Borján* J.: Nagyszilárdságú kavicsbetonok. BME Építőanyagok Tanszék Tudományos Közleményei 14. kötet, 1974.

Balázs Gy.–*Borján* J.–*Erdélyi* A.–*Györkéné Horváth* M.–*Józsa* Zs.–*Kovács* K.–*Németh* I.: Autópályahidak sózás okozta meghibásodása és a hibák javítása. Építőanyagok Tanszék. Tudományos közlemények 26. KÖZDOK, 1984.

Balázs Gy.–*Cziczó* T.–*Deméné*–*Csányi* E.: A levegő szennyezettsége hazánkban. Építőanyag, 1990. 3. sz., 96–102.
Balázs Gy.–*Csányi* E.: A beton tartósságának elméleti kutatása. OTKA 3000, Budapest, 1994.
Balázs Gy.–*Csányi* E.: A légszennyeződés hatása a vasúti betonhidakra. Sínek világa, 1994, 1–2, 36–39.
Balázs Gy.–*Csányi* E.: Dauerhaftigkeit von Stahlbeton (Einfluss von Luftschadstoffen: SO2 und NOx). 12. Internationale Baustofftagung 22–24 September, 1994, Weimar. Tagungsbericht Band 2., 266–277.
Balázs Gy.–*Csányi* E.: A levegő szennyezettségének hatása a vasbeton tartósságára, OTKA 022067, Budapest, 2001.
Balázs Gy.–*Csányi* E.: A levegő szennyezettségének hatása a vasbeton tartósságára. Vasbetonépítés, 2001, 3. szám 89–94.
Balázs Gy.–*Csányi* E.: A vasbeton korróziója agresszív oldatokban. Építőanyag, 2001, 119–129.
Balázs Gy.–*Csányi* E.: A levegő szennyezettségének hatása az acélbetétek korróziójára. Esettanulmányok II. Vasbetonépítés, 2002, 2. sz., 44–49.
Balázs Gy.–*Csányi* E.: Influence of fair pollution on the corrosion of reinforcement. Case studies 1. Concrete Structures, 2002, 1. 18–23.
Balázs Gy.–*Csányi* E.: Influence of fair pollution on the corrosion of reinforcement. Case studies 1. Concrete Structures, 2002, 2. 44–49.
Balázs Gy.–*Csányi* E.–*Balázs* L. Gy.: A levegő szennyezettségének hatása az acélbetétek korróziójára. Esettanulmányok I. Vasbetonépítés, 2002, 1. sz., 18–23.
Balázs Gy.–Csányi E.–Balázs L. Gy. (2002): Durability of reinforced concrete structures influenced by air pollution. 15 International Baustoffttagung (ibausil). 2003. September 24–27. Tagungsbericht Band 2., 953–962.
Balázs Gy.–*Csányi* E.–*Kovács* K.: A légköri szennyeződés hatása a vasbeton szerkezetekre. Környezetünk savasodása c. Országos Konferencia, Balatonfüred, 1990. november 14–15, 1–8.
Balázs Gy.–*Csányi* E.–*Tamás* F.: Effect of Air Pollution on Portland Cement Concrete – Case Studies and Model Experiments. Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement. Göteborg, Sweden, June 2–6, 1997. Volume 4.8 Performance and Durability of Cementitious Materials.
Balázs Gy.–*Csizmadia* J.–*Kovács* K.: Chloride ion binding ability of calcium-aluminate, -ferrite and -silicate phases. Periodica Polytechnica 41 (2) 1997, 148–168.
Balázs Gy.–*Erdélyi* A.: Kopásálló beton. Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest, 1968.
Balázs Gy.–*Erdélyi* A.–*Horváth* A.: Kopásálló vízépítési beton, 1965. A VÍZITERV megbízásából készített tanulmány.
Balázs Gy.–*Erdélyi* A.–*Horváth* A.: A Visegrád környéki andezitek és dácitok tartóssági vizsgálata beton adalékanyag szempontjából. Építőanyag, 1967. 4. sz. 141.
Balázs Gy.–*Erdélyi* A.–*Kovács* K.: Fagy és olvasztósók hatása beton tartósságára, Építőanyag, 1990/2., 1–11.
Balázs Gy.–*Erdélyi* A.–*Kovács* K.: A betonacél korróziója károsító anyagok betonba hatolása nélkül. Építéstechnika, Építési és Szakipari munkák. Budapest, 1991/5. 202–206. és Építőanyag, 1991/3. 82–87.
Balázs Gy.–*Erdélyi* A.–*Kovács* K.: A betonacél korróziója kloridok hatására, Építőanyag, 1991/6. 202–219.
Balázs Gy.–*Fehér* J.–*Szombathy* Z.–*Tóth* A.–*Zsigovics* I.: A Paksi Atomerőmű betonfalai hőtechnikai vizsgálata a betonozást követő időszakban. BME Építőanyagok Tanszék Tudományos Közlemények 31. KÖZDOK 1982.
Balázs Gy.–*Kelemen* J.–*Kilián* J.–*Sárosi* L.: Betonok vízzáróságának növelése a kötőanyag javítása útján. Építés- és Közlekedéstudományi Közlemények I. kötet, 1958, 303–333.
Balázs Gy.–*Kilián* J.–*Kontúr* Gy.: Színesfémsalak, nehézbeton. Mélyépítéstudományi Szemle, 1960., 6. 276–277.

Balázs Gy.–*Kiss* J.–*Nehme* G. N.–*Zsigovics* I.: A Lurdy-ház alaplemezének betontechnológiája és minőség-ellenőrzése. Vasbetonépítés 2001. 1. szám 9–14.

Balázs Gy.–*Kocsányiné Kopecskó* K.: Az acélbetétek sózás okozta korróziójának megítélése, konferenciakiadvány. V. Nemzetközi Vasbetonszerkezet-javítási Konferencia, Budapest, 2002. szeptember 4–5., Tehcno-Wato. 33–35.

Balázs Gy.–*Kopecskó* K.: Chloride binding in concrete, Concrete Structures, 2002, 47–51.

Balázs Gy.–*Kopecskó* K.: A beton kloridion megkötő képessége. Vasbetonépítés, 2003/1. 4–9.

Balázs Gy.–*Kovács* K.: A beton karbonátosodása, Építőanyag, 1990/5. 175–184.

Balázs Gy.–*Kovács* K.: A sókorrózió elleni aktív védekezés, Közlekedésépítés- és Mélyépítéstudományi Szemle, 1990/8. 288–292.

Balázs Gy.–*Kovács* K.: A téli sózás hatása a vasbeton és feszített vasbeton szerkezetekre, Környezetünk savasodása c. országos konferencia, 1990. november 14–15. 1–8.

Balázs Gy.–*Kovács* K.: A cementek kloridion-megkötő képessége, Építőanyag, 1991/1. 9–14.

Balázs Gy.–*Kovács* K.: Vasbetonszerkezetek kloridtartalmának meghatározása, Építőanyag, 1991/5. 162–172.

Balázs Gy.–*Kovács* K.–*Csányi* E.: A levegőszennyezés és más külső környezeti tényezők hatása az épületalkotó anyagokra, szerkezetekre. Az építés és környezet harmóniája konferencia. Budapest, 1993, 105–113.

Balázs Gy.–*Kovács* K.–Papp A.: Polisztirol gyöngyadalékos könnyűbeton. – Az Építőanyagok Tanszék Tudományos közlemények 15. KÖZDOK 1975.

Balázs Gy.–*Tóth* A.–*Liptay* A.–*Zimonyi* Gy.: Pályatábla és földmű hőmérsékletének számítása. BME Építőanyagok Tanszék Tudományos Közleményei 25. kötet, 1981.

Balázs L. Gy.–*Kausay* T.: Könnyű adalékanyag. Vasbetonépítés.

Baum, G.: Styropor als Zuschlangstoff für Mörtel und Beton: Betonwerk + Festigteil Technik, Heft 3/1973. 189–193.; 4/1973. 274–277.

Bäumel, A.–*Engel*, H. J.: Korrosion von Stahl in Beton, Ref. Stahl und Eisen, Düsseldorf, 1959/16. 1152–1153.

Beeby, A. W.: Cover to reinforcement and corrosion protection FIP notes 89. November, December, 1980, 4–8.

Beton és vasbeton készítése című műszaki előírás ismertetése IX. Beton VI. évf. 1. szám (1998. január) 11.

BME épületek Szerkezetei és Berendezései Intézet Épületszerkezeti Tanszék kutatási jelentése. Összeállították: *Párkányi* Mihály a műszaki tudomány doktora és Hajdú László építészmérnök, Budapest, 1973.

Boros J.-né–*Balázs* Gy.: A $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot CaCl_2 \cdot H_2O$ rendszerek hidratációja, BME Építőanyagok Tanszék Tudományos Közlemények, 1972/6. 1–106.

Breit, W.: Untersuchungen zum kritischen korrosionauslösenden Chloridgehalt für Stahl in Beton. Schriftenreihe Aachener Beitrage zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, Nor. 8/1997. Technische Hochschule, Dissertation.

Brown, R. P.– *Kessler*, R. J.: Fundamentals of Corrosion. Florida Department of Transportation. 16–19.

Browne, R. D.: Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structures. Performance of Concrete in Marine Environment. ACI Special Publication No. 65, Detroit (1980).

Budnick J.–*Starkmann* U.: Der Naturzugkühlturm Niederaußem. Beton No. 10., 1999, 548–553.

Cocks, F. H.: Manual of Industrial Corrosion Standards and Controll. ASTM, Special Technical Publ. 534; 1973, 3–32.

Collepardi, M.–*Monosi*, S.–*Moriconi*, G.–*Corradi*, M.: Tetracalcium-aluminoferrite hydration in the presence of lime and gypsum, Cement and Concrete Research, 1979/9 (4), 431–437.

Csányi E.–*Balázs* Gy.: Analysis of different cement based phases in SO_2 and NO_2 atmospheres. Periodica Politechnica Civil Engineering Technical University of Budapest. Vol. 41., 1997. Nr. 2., 169–182.

Csányi E.–*Józsa* Zs.–*Varga* Á.: Betonfelületek vízzáróságát fokozó anyagok permeabilitása, Építőanyag, 2006, 58. évf., 3. szám 75–79.

Csizmadia J.–*Balázs* Gy.–*Tamás* F. D.: Chloride ion binding capacity of tetracalcium aluminoferrite, Periodica Polytechnica Civil Engineering Technical University of Budapest, 2000/44. 135–150.

Dávid J.: Kísérleti öntött házak Csepel–Szigetszentmiklóson. Magyar Építőipar, 1959, 12. 525.

Dávid J.–*Szenes* E.–*Vass* T.: Középmagas kohóhab-salakbeton öntött lakóház építése. Magyar Építőipar, 1962, 12. 529–548.

Desideri, F.–ifj. *Nervi*, P. L.–*Positano* G. Pier Luigi *Nervi*: Serie die Architettura 15. Ranichelli Editora, Bologna, 1983.

Dombi J.: Vízzáró betonok vizsgálata. MTI előadás (1967).

Dörögdi S.–*Leszkovits* L.: Az összetétel hatása a beton kopásállóságára. Tudományos Diákköri dolgozat, 1970.

Egresi M.: Kalcium-klorid hatása a vasbetonra, Magyar Építőipar, 1960, 511–513.

Elsener, B.–*Böhni*, H.: Corrosion of steel in mortar studied by impedance measurements, Toulouse, France: Proceedings of an International Conference Electrochemical Methods in Corrosion Research, 1985, July 9.

Erlin, B.–Verbeck, G. J.: Corrosion of Metals in Concrete, Needed Research SP 49–4, American Concrete Institute Detroit, USA, 1975.

Evans, R. H.: Calcium chloride in prestressed concrete, Proc. Word Conf. On Prestressed Concrete, A 31 előadás, 1–8. Ref. Chemical Abstracts, Vol. 53. 8578, 1959.

Farsang A.: Vízzáró betonok épületszerkezeti megoldása, Beton, 2003, 9/6.

Farsang A.: Vízzáró betonok épületszerkezeti megoldása. Építőanyag, 2007, 59/4, 12–123.

Fenyvesi O.: Könnyűbeton gyaloghíd I. Az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéken készített diplomamunka – Beton, 16/5, 8–10. 2008. május.

Fenyvesi O.: Könnyűbeton gyaloghíd II. – Beton, 16/6, 10–13. 2008. június

Fischer Gy.: Öntött kohóhabsalak-betonok készítési technológiájának kidolgozása. Budapest, 1959. ÉTI jelentés. Kézirat.

Frankenhauser, P.: Keménybeton készítése. Das Bauwerk, 1961. 10/308.

Friedel, G.: Bull. Soc. Franc. Minerologe, 1903, Ref: Kühe, H.: Zementchemia, 1961.

Gábor L.–*Párkányi* M.: A nem tektonikus építés alapvető szerkezetelméleti kérdései. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1985.

Glasser, F. P.–*Kindness*, A.–*Stronach*, S. A.: Stability and solubility relations in AFm phases, Part I. Chloride, sulfate and hydroxide, – In: Cem. Concr. Res. 1999/29 (6) 861–866.

Goto, Y.: Cracks formed in concrete around deformed tension bars, ACI Journal 68, April 1971, 244–251.

Gouda, V. K.: Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel. – In Immersed in alkaline Solutions, in Britisch Corrosion Journal 5/1970. 198–203.

Grün, W.: Tartós útbetonok. Strassen u. Tiefbau, 1958. jún. 352.

Hansson, C. M.–Sorensen, B.: The treshold concentration of chloride in concrete for the initiation of reinforcement corrosion. Philadelphia: American Society for Testing Materials, ASTM 1065 – In: Corrosion Rates of Steel in Concrete, (Berke, N. S.–Chaker, V.–Whiting, D. (ed.), 3–16, 1990.

Hartl, G.: Chloridkorrosion Mitteilungen aus dem Forschungsintitut des Vereins des Österreichischen Zementfabrikanten, Heft 37., 21–53, 1984.

Hausmann, D. A.: Steel corrosion in concrete. – How does it occur? Material's Protection, Houston 6/1967, 19–23.

Hensel, W.: Chemische Reaktionen von Atmosphärilien mit Zementgebundenen Baustoffen. Betonwerk und Fertigteil Technik, 1985/11. 714–721.

Hoefer G.: Herstellung und Anwerdung von Styroport-beton. Beton, 7. sz. 296–302.
Hoffmann L.–*Józsa* Zs.–*Nemes* R.: Üveghulladékból könnyűbeton adalékanyag „Geofil–Bubbles" felhasználási lehetőségek. Építőanyag 2003. 55/1, 13–17.
Hungarocell-beton falpanelek céljaira. A TTI Kísérleti Épületeket Beruházó Csoportja és a 22. sz. Állami Építőipari Vállalat megbízásából a BME Építőanyagok Tanszékén készített tanulmány (1972). Témafelelős: *Balázs* Gy. egyetemi docens.
Huq S.–*Pama*, R. P.: Ferrocement in flexure: Analysis and design. Journal of Ferrocement, Vol. 8, No. 3. July 1978, 169–193.
Johnston, C. D.–*Mattar*, S. G.: Ferrocement-Behaviour in Tension and Compression. Proceedings ASCE Journal of Structural Division. Vol. 102. No. ST5, May 1976, 875–889.
Johnston, C. D.–*Mowat*, D. N.: Ferrocement: Material behaviour in flexure. Proc. of ASCE, Journal of Structural Division, Vol. 100, No. ST 10. Oct. 1974, 2053–2069.
Józsa Zs.–*Csányi* E.: Betonfelületek vízzáróságát fokozó anyagok tartóssága. Beton, 14/3. 2006.
Józsa Zs.–*Nemes* R.–*Fenyvesi* O.: Lehet-e könnyűbetonból hidat építeni? – ÉPKO konferencia kiadvány 2009, 201–209.
Jumper, stb.: Koptatási veszteségek és a betonszilárdság összefüggése. Journal of the ACI, 1956. jan. 563.
Jungwirth, D.–*Beyer*, E.–*Grübl*, R.: Dauerhafte Betonbauwerke. Beton-Verlag, Düsseldorf, 1986.
Karim, T. A.–*Joseph*, G. P.: Investigation on flexural behaviour of ferrocement and its application to long-span roofs. Journal of Ferrocement, Vol. 8 No. 1. Jan. 1978, 1–21.
Kaszóné Szőnyi É.–*Kovács* J.: A győri AUDI G40 Szerszámgépgyárban készült vízzáró alaplemez nagy teljesítőképességű betonja. Bebon, XIII. évf. 3. sz., 2005. március
Kászonyi G.: Anyagvizsgálati szakvélemény. BME, 1984, 1987.
Kászonyi G.: Vékony keresztmetszetű dermesztett beton és vasbeton szerkezetek Magyarországon. Technika 37/ 6, 1993.
Kászonyi G.: Thin sectioned numbed concrete and numbed reinforced concrete structures. Science and Technology in Hungary, 1994.
Kászonyi G.: Gipszbeton szerkezetek tervezési módszereinek továbbfejlesztése. Kandidátusi disszertáció, 1994–1995.
Kászonyi G.: Gipszbeton szerkezetek méretezésének új módszere – Cleveland, USA, 1998.
Kászonyi G.: Gipszbeton szerkezetek tervezése Magyarországon. ÉRT Referenciatár, 1999.
Kászonyi G.: Gipszbeton szerkezetek tervezési módszereinek továbbfejlesztése. ÉMT Műszaki Szemle, Kolozsvár, 2001/15, 10–16.
Kászonyi G.: Gipszbeton szerkezetek tervezési módszereinek továbbfejlesztése. Tudományos Közlemények SZIE YBL Miklós Műszaki Főiskolai Kar, X. 2004. I/1.
Kausay T.: Építési kőanyagok kopási vizsgálata Böhme-féle módszerrel. Építőanyag. 35/9, 346–358. és 35/10, 376–385. 1983.
Kausay T.: Gázbeton, pórusbeton, Beton, 10/7–8, 25. 2002. július-augusztus
Kausay T.: Könnyű-adalékanyag. Beton, 10/ 11. 3–5. 2002. november
Kausay T.: Könnyűbeton. Beton, 10/10, 3–4. 2002. október
Kausay T.: Kopásállóság-vizsgálat. Fejezet a Cement-beton kisokos című könyvben. Holeim Hungária Zrt., 2008.
Kausay T.: Betonok környezeti osztályai. Beton. 17/7–8, 3–8. 2009. július–augusztus
Kerekes B.: Falazat kőzetadalékos egyszemcsés öntött betonból. Doktori értekezés, 1978.
Kiss R.: Vízzáró beton. Tudományos Diákköri pályázat 1987. Konzulensek Balázs Gy. egyetemi tanár, Dombi J. tudományos osztályvezető helyettes.
Kopecskó K.–*Balázs* Gy.: Influence of Steam Curing on Chloride Ion Binding Capacity of C_3A, Proceeding, 15. ibausil – Internationale Baustofftagung, (Redaktion: Dr.-Ing. H.–B. *Feischer*), 24–27 September 2003. Finger-Institut für Baustoffkunde, Weimar, 2003., Band 2. 963–973.

Kopecskó K.–*Balázs* Gy.: Kloridok a vasbetonban, konferenciakiadvány, ÉPKO 2003 Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, Csíksomlyó, 2003. május 29–június 1., 151–156.

Kopecskó K.–*Balázs* Gy.: Chloride Ion Binding of Cement Clinkers, Proceedings of the International Symposium on Durability and Maintenance of Concrete Structures, (Editor: Radič, J.), 21–23 October, 2004., Dubrovnik, Croatia, 273–280.

Kopecskó K.–*Balázs* Gy.: Influence of Steam Curing on Hydration and Chloride Ion Binding Capacity of C_3A and C_4AF, Proceedings of the 5rd International Ph.D. Symposium in Civil Engineering, (Editors: Walraven, J., Blauwendraad, J. and Scarpas, T.), 16–19 June 2004, Delft, BALKEMA Publishers 2004, Volume 2. 781–787.

Kopecskó K.–*Balázs* Gy.: A jégtelenítő sózás hatása a cementhidratációra, konferencia kiadvány, ÉPKO 2005 Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, Csíksomlyó, 2005. június 2–5., 143–150.

Kovács K.: Nehézbetonok tartóssága. Betonszerkezetek tartóssága című konferencia kiadványa 2008.

Kovács K.–*Balázs* Gy.: A téli sózás hatása az épített környezetre. Környezetünk savasodása c. országos konferencia 1990. november 14–15. 1–9.

Kovács K.–*Csizmadia* J.–*Balázs* Gy.: Analysis of the chloride binding ability of cements. Periodica Polytechnica Civil Engineering. Technical University of Budapest. Vo. 41 (1997), Nr. 2, 183–198.

Könnyűbetonkísérletek. A KPM Közúti Hídosztály és az UVATERV megbízásából az ÉKME II. számú Hídépítéstani Tanszékén – az Alagútépítés, Földművek és Talajmechanika Tanszéke közreműködésével készített tanulmány. Témafelelős: *Balázs* Gy. egyetemi adjunktus és *Kilián* J. egyetemi adjunktus (1960).

Kunszt Gy.: Bauxitadalékú sugárvédő nehézbeton. Kandidátusi értekezés, Budapest, 1961.

Kuzel, H. J.: Röntgenuntersuchung im System $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot nH_2O$–$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot \cdot nH_2O$–$H_2O$, Neues Jahrbuch Miner. Mh., 1966, 193–200.

Kuzel, H. J.–*Pöllmann*, H.: Hydration of C_3A in the presence of $Ca(OH)_2$, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ and $CaCO_3$, – In: Cement and Concrete Research 1990/20 (6) 885–895.

Logan, D.–*Shah*, S. P.: Moment Capacity and craking behaviour of ferrocement in flexure. Journal of ACI Proc. Vol. 70. No. 12. Dec. 1973, 799–804.

Lukas, W.: Eindringung von Chloridlösungen is Beton herkömlicher Zusammensetzung, Frühhochfester Beton bzw. Fliessbeton. Mitteilungen aus dem Institut Baustofflehre+Materialprüfung an der Universität Innsbruck (1980/1981.), 6/7. sz. 26.

Lukas, W.: Chloride Penetration in Standard Concrete, Water-Reduced Concrete, and Superplasticized Concrete, Kolloquium Chloridkorrosion, Wien, 1983.

Lukas, W.: Der Einfluss von Feinlift auf die Chloriddiffuzion im Beton, Kolloquium Chloridkorrosion, Wien, 1983.

Lukas, W.: Zur Frage Chloridbildung und Korrosion von Stahl, Kolloquium Chloridkorrosion, Wien.

Mihailich Gy.–*Haviar* Gy.: A vasbetonépítés kezdete és első létesítményei Magyarországon. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1966.

Mihaukucg Gy.–*Haviar* Gy.: A vasbetonépítés kezdete és első létesítményei Magyarországon. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1996.

Mironov, Sz. A.–*Arobelidze*, G. A.: Voproszi tyehnologii viszokoprocsnovo bisztrotvergyejuscsevo betona. – Beton i Zselezobeton, 1955, 4, 137–143.

Monfore, C.–*Verbeck*, G. J.: Corrosion of Prestressed Wire in Concrete, Bulletins Published by the Research Department, Research and Development Laboratories of Partland Cement Assotiation, 57, 1960/24. 33–37.

Naaman, A. E.–*Shah*, S. P.: Tensile tests of ferrocement, Journal of ACI Proc. Vol. 68 No. 9. Sept. 1971, 693–698.

Náday G.–*Weisz* Gy.: Vékonyfalú vasalt cementhabarcs szerkezetek. Magyar Építőipar, 1964.

Nemes R.: Habüveg adalékanyagos könnyűbetonok PhD értekezés BME 2006.

Nemes R.–*Fenyvesi* O.–*Józsa* Zs.: Könnyűbeton hídszerkezetek, lehet ségek és a gyakorlat – Közlekedéstudományi Szemle.
Nemes R.–*Gyömbér* Cs.: Könnyűbeton adalékanyagok összehasonlító vizsgálata. TDK dolgozat. Konzulens: *Józsa* Zs. BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék (2001).
Nemes R.–*Józsa* Zs.: A könnyűbeton története és öröksége. Történeti tartószerkezetek 8. Tudományos Ülésszak: Történeti Tartószerkezetek Öröksége, Cluj-Napoca, Románia 2004. 10. 27–30. 134–141.
Németh F.: Vízzáró beton technológiája. Beton, 12/ 6. 2004.
Nischer, D.: Karbonatisierung. Mitteilungen aus Forschungsinstitut des Vereins der Österreichhischen Cementfabrikanten. Heft. 37.
Ost B.–*Monfore*, G. E.: Penetration of Chloride into Concrete. Mats. Perf. 21. 1974. február.
Ottmár B.–*Petro* B.: A monolitfalas öntöttbeton építésmód magyarországi fejlődése. Építőipari és Közlekedési Műszaki Egyetem Tudományos Közleményei XIII. 1968, 6. 47–82.
Palotás L.: Minőségi beton. Közlekedési Kiadó, Budapest, 1952.
Palotás L.: Építőanyagok I–II., Budapest, 1959.
Palotás L.–*Balázs* Gy.: Mérnöki szerkezetek anyagtana 3. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1968.
Palotás L.–*Balázs* Gy.: Mérnöki szerkezetek anyagtana 3. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1980.
Palotás L.–*Balázs* Gy.–*Erdélyi* A.: Kopásálló vízépítési beton. A BME Építőanyag Tanszékén készült tanulmány, Budapest, 1965.
Panfilova, L. I.–*Kozlova*, G.A.: Vlijanyije hlorisztovo kalcija na korroziju sztalnoj armaturi, Beton i Zselezobeton, 1995/1, 33–37.
Párkányi M.: Nem tektonikus szerkezetek, Építés, Építészettudomány 1969/1–4.
Pataricza I.: A Kazincbarcikai Könnyűbetongyár gyártmányai. Magyar Építőipar, 1964, 6. 324–328.
Petterson, K.: Corrosion treshold value and corrosion rate in reinforced concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute – In: CBI Report 2–92. 1990.
PN–62/B–06256. Kopásálló beton szabvány (lengyel).
Ratyinov, V. B.–*Dovzsik*, O. I.: Zascsita armaturi ot korrozii v betonye sz dobavkami hlorisztovo kalcija, Beton i Zselezobeton, 1959/2. 92–94.
Rechberger, P.: Elektrochemische Modellversuche zur Frage der chloridinduzierten Betonstahlkorrozion. In: Zement-Kalk-Gips 36. Nr. 10., 582–590.
Rechberger, P.: Elektrochemische Prüfung von Betonelektroden hinsichtlich der Chlorideinbindung im höheren Probenalter. Untersuchungsbericht P 18 des. Forschungsinstitut des Vereins des Österr. Zementfabrikanten, Wien, 1983.
Rechberger, P.: Grundsätzliche Untersuchungen an Stahl in alkalisch-wässriger Lösung bei Gegenwart von Chloriden als Modell für das Verhalten von Stahleinlagen im Beton unter Chlorideinwirkung. Wien: Forschungsbericht Nr. P1.
Rehm, G.–*Nürnberger*, U.–*Neubert*, B.: Chloridkorrosion von Stahl in gerissenem Beton. – A: Bisheriger Kenntnisstand. – B: Untersuchungen an der 30 Jahre alten Westmole in Helgoland. – C: Auslagerung gerissener, mit unverzinkten und feuerverzinkten Stählen bewehrten Stahlbetonbalken auf Helgoland. Berlin: Bauth. – In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Nr. 390., 43–144.
Rehm, G.–*Nürnberger*, U.–*Neubert*, B.–*Neuninger*, F.: Einfluss von Betongüte, Wasserhaushalt und Zeit auf das Eindringen von Chloriden in Beton, DAfStb Heft 390., Berlin, 1988, 1–57.
Richartz, W.: Die Bindung von Chlorid bei der Zementerhärtung. Zement-Kalk-Gips, 1969, 447–456.
Rigan, J.: Betonkeverék- és szilárdbeton-vizsgálat nagy dunai vízierőmű számára VUSKMB–46–55 és VUTMS–56. sz. tanulmány, Pozsony, 1956.
Rigan, J.: Kopásálló betonok. –17/61–63. sz. tanulmány, Pozsony, 1963.
Romić, S.–*Lazić*, M.: Armirani lakoagregatni beton IRO Gradevinska knjiga. Beograd, 1985.
Rudnai Gy.: Könnyűbeton. Bp., 1961. Műszaki Könyvkiadó – Light –Weight Concretes. Bp., 1963. Akadémiai Kiadó.

Sabnis, G. M.–*Naaman*, A. E.: Recent developments of ferrocement in North America. Proc. of the International Conference on Materials of Construction for Developing Countries. Bangkok, Thailand, Aug. 1978, 661–675.

Sámsondi Kiss B.: Szövetszerkezetes épületek. Műszaki Kiadó, Budapest, 1965.

Schiessl, P.: Einfluss von Rissen auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton und Spannbetonbauteilen. DAFST H 370, 11–52, W. Ernst und Sohn. (1986).

Schiessl, P.–*Breit*, W.–*Raupach*, M.: Überwachung von Betonbauwerken – Sensortechnik: Schutz statt Instandsetzung. In: Deutsches Ingenieurblatt 3/1996, Nr. 11., 40–46 (B6).

Schiessl, P.–*Raupach*, M.: Chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton. In: Beton-Informationen 28/1988, Nr. 3/4, 33–45.

Schiessl, P.–*Raupach*, M.: Influence of concrete composition and microclimate on the critical chloride content in concrete. London: Elsevier – In: Corrosion of Reinforcement in Concrete, International Symposium, Wishaw, Warwickshire, UK, May 21–24, 1990. (*Page*, C. L.; *Treadaway*, K. W. J.; *Bamforth*, P. B. (Ed.). 49–58.)

Schiessl, P.–*Raupach*, M.: Untersuchungen über den kritischen, korrosionsauslösenden Chloridgehalt und die Korrosionsgeshwindigkeit im Stahlbeton. Aachen: Institut für Bauforschung – Forschungbericht Nr. 258.

Schiessl, P.–*Wiens*, U.–*Breit*, W.: Reduzierung des Alkalitätsdepot durch Puzzolane. Aachen: Institut für Bauforschung – Forschungbericht Nr. F22.

Schliessl, F.–*Schwarzkopf*: Caloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton. Beton+Fertigteil Technik 52, 1986, 626–635.

Scholl, E.–*Knöfel*, D.: Der Einfluss von Luftschandstoffen auf Betonbauwerke, Beton, 1991/1, 17–21.

Schrage, I.: Korrosion von Stahl im Beton – ohne zutritt von Schadstoffen, Baustoffinstitut der Technischen Universität München, Fachtagung, 1987, 11–15.

Shah, S. P.: Ferrocement as a new engineering material. Report No. 70–11. Department of Materials Engineering, University of Illinois at Chicago Circle, 1970, 37.

Smolczyk, H. G.: Chloriddiffusion-Phänomen und Strand der Kentniss. Kolloquium Chloridkorrosion. Wien. 1983.

Snowdon L. C.–*Enwards*, A. G.: A természetes adalékanyagok vízfelvétele és ennek hatása a betonra. Magazin of Concrete Research, 14. 1962, 41. sz. 109.

Sobó J.: Középítéstan I. Országos Erdészeti Egyesület, 1998.

Sommerville, G.: The design life of concrete structure. – The Structural Engineer, Vol. 64A, 1986. No2. February, 60–71.

Springenschmied, R.: Untersuchung über Eindringtiefen von Chloridionene in Beton. Kolloquium Cloridkorrosion, Wien, 1983.

Ständige Internationale Vereinigung der Strassenkongresse. 16. Weltstrassenkongress – Wien, 1979. Nationalbericht, Italien, Frage 2. 33–35.

Székely I.: H szigetelő könnyűbetonok. Budapest, 1962 MTI 4029 sz.

Szizov, V. N.: Premenyenyije himicseszkih dobarok v sztorityelnih rasztvorah i betonah. – Bulleteny Sztorityelnoj Tyehnyiki, 1958.

Tenke T.: Budafoki kísérleti lakótelep középmagas öntöttház. ÉM Műszaki Tervezés, 1964, 9. 11.

Tevan Zs.: Téglatörmelék hasznosítása építőipari falazó elemek előállítására. Budapest, 1969. BME Építőanyagok Tanszék. Tanulmány.

Thanh, Ng. H.: Ferrocement-armocement. Mélyépítéstudományi Szemle. XXXV. évf. 1985. 4. szám.

Thanh, Ng. H.: A homok vízszükségletének és hézagtérfogatának meghatározása a ferrocement betonjának tervezéséhez. Mérnök-matematikai szakmérnöki diplomamunka. BME Vasbetonszerkezetek Tanszéke és Építőanyagok Tanszéke. Budapest, 1986. május.

Thanh, Ng. H.: Ferrocement betonjának tervezése – kandidátusi értekezés, 1986. Aspiránsvezet k: dr. *Orosz* Árpád egyetemi tanár, a műszaki tudomány kandidátusa és dr. *Balázs* György egyetemi tanár, a műszaki tudomány doktora

Thanh, Ng. H.: Ferrocement mint építőanyag és építési mód. Mélyépítéstudományi Szemle. 39/2. Budapest, 1987.

Thanh, Ng. H.: The Water-Demand and the Gap-Volume of Aggregate for Ferrocement. Journal of Ferrocement, Vol. 20, No. 3. July, 1990, 241–256.

Thanh, Ng. H.: Optimal Concrete Composition Based on Paste Content for Ferrocement. Journal of Ferrocement, Vol. 21, No. 4. July, 1991, 331–350.

Thanh, Ng. H.: Fracture Mechanism of Ferrocement Depending on Paste Content. Journal of Ferrocement. Vol. 22, No. 2, April, 1992, 163–179.

Thanh, Ng. H.–*Balázs* L. Gy.: Nervi nyomában. Magyar Építőipar 39/11, 513–517. Budapest, 1990.

Tuutti, K.: Corrosion of steel in concrete, (B). Forskning Research, Stockholm, 1982, 4–82.

Uhl, F.: Keménybeton a vízépítésben. Der Tiefbau, 1960. 4. sz.

Ujhelyi J.: Kohóhabsalak-betonok. Budapest, 1959. Építőanyag, 12.

Ujhelyi J.: Mesterséges adalékanyagok felhasználásával készülő könny betonok technológiájának kidolgozása. Budapest, 1959. ÉTI 6. sz. jelentés.

Ujhelyi J.: Az agyagkavics- (keramzit-) beton készítési technológiájának kutatása. Budapest, 1960. ÉTI tanulmány (kézirat).

Ujhelyi J.: Könnyűbetonok fajtái és tulajdonságai, a beton készítése. Budapest, 1960. Mérnök Továbbképző Intézet.

Ujhelyi J.: Perlitbeton–perlithabarcs. Budapest, 1963. Műszaki Könyvkiadó.

Ujhelyi J.: Könnyűadalékanyagos betonok összetételének tervezése. Kandidátusi disszertáció, Budapest, 1968.

Ujhelyi J.: A MÉASZ ME-04.19:1995. Beton és vasbeton készítése című műszaki előírás ismertetése. IX. Beton, VI. évf. 1. sz. (1998. január) 11.

Ujhelyi J.: A beton használati élettartamának a becslése. Betonszerkezetek tartóssága c. konferencia kiadvány, 1996, 107–109.

Ujhelyi J.: Betonismeretek. Műegyetemi Kiadó, 2005.

Vendl A.: Geológia. Tankönyvkiadó, Budapest, 1953.

Volkwein, A.–*Springenschmied*, R.: Corrosion of reinforcement in concrete bridges at different age due to carbonation and chloride penetration. Kolloquium Chloridcorrosion. 1982. Wien.

Volkwein, A.: Chlorideindringen und Stahlkorrosion durch Chlorid. Baustoffinstitut der Technischen Universität München, Fachtagung, 1987., 17–22.

Voznyeszenszkij, V. A.: O sztrukture armocementa. Armocement i armocementnüe Konstrukcije: Gosszroiizdat. Moszkva, 1962, 26–36.

Waddel: A beton minőségellenőrzésének gyakorlata. McGraw Hill, New York, 1962.

Waddel: A beton ütőszilárdsága. The Institution of Civil Engineers, Proceedings, 28. k. 1963. júl.

Walkus, R.–*Kowalski*, T. G.: Ferrocement: A Survey. Concrete (London), vol. 5., No. 1, Feb. 1971, 1–5.

Weigler, H.–*Segmüller*, E.: Betonwerk+Fertigteil-Technik, 39. k. (1973), 8., 1973, 557–584.

Weiss Gy.: A No-fines építési rendszer rövid ismertetése. Építés–Minőség,1979, 3., 8–10.

Wischers, G.: Korrosionsmechanismen bei Chlorideinwirkung auf Stahlbetonbauteile. Kolloquium Chloridkorrosion. Wien, 1983.

Zsigovics I.–*Berecz* A.: Vízzáró betonok technológiája. Beton, 7/ 6, 1999.

Zsigray, J.: Betonkeverék és betonvizsgálat nagy dunai vízi létesítmény számára. VUSKMB 4b–55 és VUTMS–5–b–56. sz. tanulmány, Pozsony 1956.

A kiadásért felelős
az Akadémiai Kiadó Zrt. igazgatója
Szerkesztette: Gilicze Gábor
Felelős szerkesztő: Tárnok Irén
Termékmenedzser: Egri Róbert
Borítóterv: Starkiss Stúdió
Tördelés, nyomdai előkészítés: Starkiss Kft.
A nyomdai munkálatokat
az Akadémiai Nyomda Kft. végezte
Felelős vezető: Ujvárosi Lajos
Martonvásár, 2010
Kiadványszám: TK090040
Megjelent 22 (A/5) ív terjedelemben

A *Különleges betonok és betontechnológiák* III. kötete hat különleges betont, illetve betontechnológiát mutat be, s három fejezet a beton tartósságával kapcsolatos ismereteket közöl.

Különleges betonok:

Ferrocement

Dermesztett beton (szövetszerkezetes építés)

Sugárvédő beton

Vízzáró beton

Könnyűbeton

Kopássálló beton

A beton tartósságával kapcsolatos fejezetek:

A tartósság követelményei és növelésének módszere

A légköri szennyeződés hatása a betonra

A téli jégtelenítő sózás hatása az acélbetét korróziójára

Kötetünk segítséget szeretne nyújtani betontechnológusok és szakmérnökök számára a betonok és betontechnológiák tudatos alkalmazásához.

Akadémiai Kiadó ■ www.akademiaikiado.hu

ISBN 978-963-05-8920-8

9 789630 589208