



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉSTERVEZET

DOMONYI ERZSÉBET

A kritikus infrastruktúra létesítményeinek telepítési sajátosságai

Témavezető(k): Prof. Dr. Réger Mihály Antal
Prof. Dr. Zachár András

**BIZTONSÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA**

Budapest, 2025 december 22

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS	5
A tudományos probléma megfogalmazása	5
A kutatómunka célkitűzései	5
A TÉMA KUTATÁSÁNAK HIPOTÉZISEI	6
KUTATÁSI MÓDSZEREK	7
1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	8
1.1 A betonokról általában	8
1.1.1 A betonok kötési - szilárdulási fázisai.....	8
1.1.2 A betonok csoportosítása	11
1.1.3 Használati élettartam, szilárdság és a tartósság definiálása	13
1.1.4 A betonok karbantartási és ellenőrzési módszerei	15
1.2 Tömegbetonok.....	18
1.2.1 Tömegbeton fogalma.....	18
1.2.2 Tömegbetonok felhasználási területei	19
1.2.3 A tartósság növelése (tervezéssel, építéssel).....	19
1.3 Tömegbetonban létrejövő repedések kialakulása és elkerülése	20
1.4 A beton szilárdulása során fejlődő hidratációs hőmennyiség	23
1.4.1 A portlandcement hidratációja	23
1.4.2 A tömegbetonok hidratációhő okozta repedései	26
1.4.3 A betonszerkezetek hőmérsékleteloszlását befolyásoló tényezők	29
1.5 Hőmérsékletmérési módszerek a tömegbetonok felszínén és belsejében	38
1.5.1 Hidratációhő meghatározásának mérési módszerei	38
1.5.2 Hőmérséklet mérésére alkalmas eszközök	39
1.7 Hőmérsékletszámítási módszerek a VEM / DEM segítségével	45
1.8 A végeselemes módszer alkalmazása a tömegbeton szerkezetek esetén	46
1.8.1 A tömegbetonok repedési hajlamának vizsgálata	46

1.8.2 Betonacél alkalmazása során felmerülő kérdések	48
1.8.3 A talaj és a levegő hatása a beton próbatestre	48
1.8.4 Változó környezeti hőmérséklet hatása a tömegbeton szerkezet hőmérsékleti mezőjére	49
1.9 A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése	50
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	51
2.1 Egyedi kaloriméter fejlesztése	51
2.1.1 A berendezés tervezése és összeállítása [62]	52
2.1.1.1 A hőszigetelt tartály kialakítása	52
2.1.1.2 A hőszigetelés kialakítása	54
2.1.1.3 A hőmérsékletmérés	55
2.1.1.4 A mérési adatgyűjtő	56
2.2 AZ EGYEDI FEJLESZTÉSŰ KALORIMÉTERBEN VÉGZETT MÉRÉS EREDMÉNYEINEK FELHASZNÁLÁSA	58
2.2.1 CEM III és a CEM I típusú cementek összehasonlítása.....	58
2.3 A KUTATÁSI TERV VÉGESELEMES ANALÍZIS MÓDSZERÉRE	58
2.3.1 Az analízis során alkalmazott anyagok tulajdonságai	59
2.3.2 A cement	59
2.3.3 A végeselemes analízis módszere, a mérések	61
2.3.4 Különböző méretű betontestek összehasonlítása CEM III típusú cementből készült beton esetén.....	62
2.4 A BETON PRÓBATEST HŐMÉRSÉKLETEINEK ALAKULÁSA	62
2.5 TÖMEGBETON SZERKEZETEK HŐMÉRSÉKLETELOSZLÁSA A TALAJBAN	63
2.6 A talaj és a levegő hatása a betonra.....	64
2.7 Változó környezeti hőmérséklet hatása a tömegbeton szerkezet hőmérsékleti mezőjére	65
2.8 A betonacél befolyásoló hatásának vizsgálata	66

2.9 A betonacél befolyásoló hatásának elemzése eltérő mennyiségű betonacél esetén [66]	68
3. VIZSGÁLATOK ÉS EREDMÉNYEK	69
3.1 Egyedi kaloriméter fejlesztése	69
3.1.2 A kaloriméter hőtani jellemzőinek meghatározása [64]	69
3.1.3 A hőmérséklet kompenzálása a kaloriméter veszteségével.....	70
3.1.4 A hőtermelés meghatározása.....	71
3.1.5 A hőérzékelők egymáshoz kalibrálása	71
3.1.6 A kaloriméter hőveszteségének meghatározása.	72
3.2 A CEM III és a CEM I típusú cementek összehasonlítása [67]	75
3.3 Különböző méretű betontestek összehasonlítása CEM III típusú cementből készült beton esetén [68]	77
3.4 A beton próbatest hőmérsékleteinek alakulása [65].....	78
3.5 Tömegbeton szerkezetek hőmérsékleteloszlása a talajban.....	82
3.6 A talaj és a levegő hatása a betonra.....	85
3.7 Változó környezeti hőmérséklet hatása a tömegbeton szerkezet hőmérsékleti mezőjére	87
3.8 A betonacél befolyásoló hatásának vizsgálata	89
3.9 A betonacél befolyásoló hatásának elemzése eltérő mennyiségű betonacél esetén	91
4. ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK	94
4.1 Kutatásom összegzése	94
4.2 Új tudományos eredmények.....	96
IRODALOMJEGYZÉK.....	99
RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK	104
TÁBLÁZATJEGYZÉK	104
ÁBRAJEGYZÉK	105
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	109

BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

Ebben a fejezetben a kutatási témakör jelentőségét és aktualitását mutatom be. A problémakör általános áttekintését követően ismertetem a célkitűzéseket, az ezekhez kapcsolódó hipotéziseket, valamint a kutatási, vizsgálati és matematikai modellezési tevékenység módszertanát.

A tudományos probléma megfogalmazása

A XXI. században - a víz után - a második legnagyobb mennyiségben felhasznált anyag a beton. Az építési projektek döntő százalékánál a beton ill. tömegbeton szerkezetek a meghatározóak. A lakó, kereskedelmi és ipari célú építmények valamint a közlekedéshez, szolgáltatásokhoz köthető intézmények és védelmi céllal készült létesítmények mindegyike betonozott szerkezetekből készül. Egy-két példát kiragadva: paksi erőmű épületei, Köröshegyi völgyhíd, budapesti metró, MÁV Kórház épületegyüttese. Megkülönböztetünk vékony, illetve közepes vastagságú (max. 40 cm) szerkezeteket és tömegbetonokat, ez utóbbiak szerkezeti vastagsága meghaladja a 40 cm-t. Az értekezés a 40 cm-nél nagyobb vastagságú tömegbeton szerkezetek telepítési sajátosságaival foglalkozik. Általánosságban megállapítható, hogy az építmények, műtárgyak alapjául szolgáló tömegbetonok időállóságát és tartósságát biztosítani sokkal nagyobb kihívás, mint a vékonyabb szerkezetekét.

A lakó-, ipari-, kereskedelmi célú épületek, építmények mellett kiemelten fontos azon műtárgyak létesítési problematikája, melyek a kritikus infrastruktúra elemeihez kapcsolódnak (pl. völgyzárógátak, atomerőművek betonszerkezete). Ezen létesítmények telepítésekor – az esetleges katasztrófahelyzetek kialakulása okán – különösen ügyelni kell a teherhordó szerkezet élettartamra való tervezésére és kivitelezésére.

A kutatómunka célkitűzései

A műszaki gyakorlatban a tömegbetonok készítésekor gyakori probléma a szerkezet belsejében és külső felszínén kialakuló hőmérsékletekből fakadó hőmérsékletkülönbség. Annak mértéke erősen befolyásolja a készülő betonszerkezet állékonyságát, teljesítőképességét. A szerkezet különböző pontjain kialakuló hőmérséklet mérésére számos módszer létezik a gyakorlatban. A hőmérsékletmérési eredményeket a végeselemes

számítások bemeneteként használva a kutatók igyekeznek a készülő betonszerkezet hőmérsékleti viselkedését jellemezni, ezzel biztosítva a repedésmentes kialakítást.

A fentiek figyelembevételével a kutatómunkám célja a tömegbetonok kötésekor kialakuló hőmérséklet különbség megbízható előrejelzése. A kitűzött cél meghatározásához szükséges a végeselemes analízis bemeneti paraméterei gyors és gazdaságos mérésére alkalmas berendezés fejlesztése. A berendezés egyedi fejlesztésű kaloriméter, amely a benne elhelyezett cementhabarcs minta hőmérsékletét képes mérni 7-10 napon keresztül.

A fent nevezett célkitűzés lépései, főbb pontjai a következők:

1. egyedi fejlesztésű kaloriméter megépítése a különböző cement típusok gyors és gazdaságos hőmérsékletmérésének elvégzéséhez,
2. az egyedi fejlesztésű kaloriméter hőveszteség kompenzációjának elvégzése,
3. különböző cement fajták hőmérsékletének mérése az egyedi fejlesztésű kaloriméterben,
4. cementhabarcs minta hőmérsékletmérési eredményeinek felhasználásával történő végeselemes analízis a cementhidratációs hő alakulása és befolyásoló tényezőinek feltérképezése céljából.

A téma kutatásának hipotézisei

A téma kutatásának első fázisában, a célkitűzéseimmel összhangban az alábbi hipotéziseket állítottam fel:

H1: Feltételeztem, hogy az egyedi fejlesztésű kaloriméter féladiabatikus rendszerben mért hőmérsékleti értékei átalakíthatóak adiabatikus rendszert leíró hőmérsékletekké. Ehhez hőtani kompenzációs modell szükséges.

H2: Feltételeztem, hogy a tömegbeton szerkezet betonozásakor kialakuló maximális hőmérséklet különbség kialakulásának időpontját a környezeti hőmérséklet és a konvektív hőtranszport együttható változása befolyásolja.

H3: Feltételeztem, hogy a talaj hőelvonó hatása a tömegbeton szerkezetben kialakuló maximális hőmérsékletet erőteljesen befolyásolja.

H4: Feltételeztem, hogy a repedésveszély hőtani jellemzése szempontjából a vasbeton szerkezetek és a betonacélt nem tartalmazó szerkezetek eltérően viselkednek.

H5: Feltételeztem, hogy a végeselemes analízishez létezik olyan minimális modellméret amely a tömegbeton szerkezetet hőtani értelemben jellemzi és a modellezés során próbatestként tekinthetünk rá.

H6: Feltételeztem, hogy a napi hőmérséklet ingadozás befolyásolja a betonozás kezdeti időpontját, amelyet a szerkezet repedésveszélyének minimalizálása érdekében figyelembe kell venni.

Kutatási módszerek

A kutatási téma interdiszciplináris jellege miatt több tudományterület ismeretanyagára kellett támaszkodnom, melyek közül az anyag-, fizika és informatikai tudományokat emelem ki. A kutatás során alkalmazott kísérleti és modellezési módszerek megválasztása során arra törekedtem, hogy azok a műszaki gyakorlatban is hasznosítható, reprodukálható eredményeket szolgáltatassanak.

A szakirodalom kutatás keretében áttekintettem és értékeltem a hazai és nemzetközi szakirodalmi közleményeket. Az eredményeim gyakorlati alkalmazása, alkalmazhatósága és validálása érdekében a munkám során folyamatos kapcsolatot ápoltam a hazai szakemberekkel, alapanyaggyártókkal, laboratóriumokkal.

A szakirodalom áttekintését követően végeselemes számítási módszert alkalmaztam. A kutatás során felmerült az igény a kismintás laboratóriumi mérésekre, ennek okán saját fejlesztésű berendezést készítettem. Ennek a berendezésnek a segítségével további bemeneti paramétereket tudtam definiálni a végeselemes számításokhoz. A lassan felszabaduló hidratációs hő mérése a szabványos laboratóriumi mérések esetén 40-41 óra időtartamú. A szakirodalmi kutatásaim során megállapítottam, hogy ennél hosszabb időintervallum, 7-10 nap is szükséges lehet a betonszerkezetekben a hőmérsékletek konszolidálódására, a szerkezet geometriájának függvényében.

A hőtani folyamatok vizsgálatához a cement hidratációs hőjének jellemzése szükséges, ezt leginkább kaloriméteres mérésekkel valósíthatjuk meg. A mérési eredmények a végeselemes módszer segítségével felhasználhatóak különböző összetételű, más körülmények között alkalmazható betonok széles skáláján is. Ennek okán került sor egy egyedi fejlesztésű kaloriméter megépítésére és vizsgálatokra a kutatásom során. Az általam fejlesztett kaloriméter kismintás és nagy pontosságú hőmérsékletmérésre alkalmas.

1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Ebben a fejezetben a betonok és tömegbetonok bemutatása, a szerkezetekkel szemben támasztott követelmények részletezése mellett a konstrukciók tartóssági kérdéseit, illetve a konstrukció tartósságát veszélyeztető körülményeket tekintem át.

1.1 A betonokról általában

A fejezetben a betonokról általános és specifikus tulajdonságait tekintem át. Ismertetem a kötés és a szilárdulás folyamatai közötti különbségeket, a betonokkal szemben támasztott követelményeket (szilárdság, tartósság, használati élettartam), betonok karbantartási lehetőségeit s annak hatásait a tartósságra.

1.1.1 A betonok kötési - szilárdulási fázisai

A beton kötési - szilárdulási állapota szerint megkülönböztethető a frissbeton és a megszilárdult beton. A frissbeton állapot felosztható zöld beton és fiatal beton szakaszokra. Az osztályozás szükségszerűsége abban rejlik, hogy a beton a fenti fázisokban alapvetően eltérő tulajdonságokat mutat, így a viselkedésének leírására szolgáló jellemzők is különböznek. Az 1. táblázat áttekintő képet ad a betonszerkezetek legfontosabb tulajdonságairól a betonkészítés egyes szakaszaira vonatkozóan.

ÁLLAPOT	LEGFONTOSABB JELLEMZŐK	BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK
Frissbeton	- Konzisztencia, stabilitás - Eltarthatóság - Bedolgozási tényező - Levegőtartalom	- Betonösszetétel - Keverési arány - Péptelítettség mértéke - v/c tényező
Zöld beton	- Zöld szilárdság	- v/k tényező
Fiatal beton	- Fiatal szilárdság - Szilárdulási folyamat	- Testsűrűség
	-Tömegével kapcsolatos jellemzők (testsűrűség, tömörség és porozitás)	k: kötőanyag (cement + szilikapor, metakaolin)

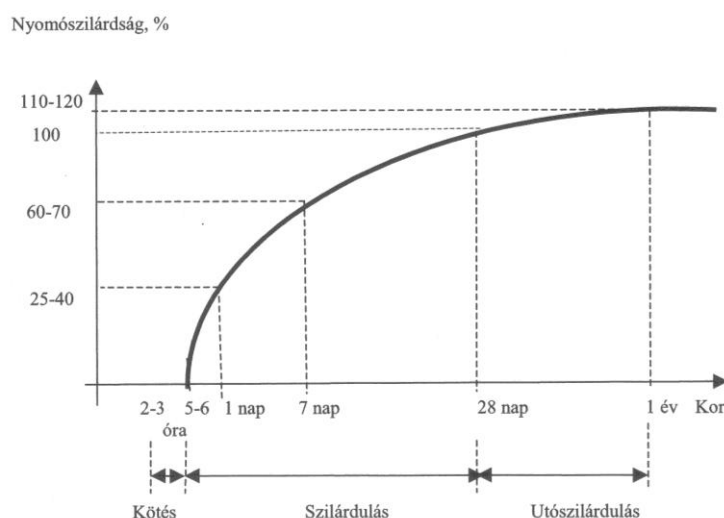
Megszilárdult beton	- Mechanikai jellemzők (nyomószilárdság, hasító-húzószilárdság, kopásállóság) - Hidrotechnikai jellemzők (víztartalom, vízfelvétel, vízzáróság) - Alakváltozási jellemzők (zsugorodás, duzzadás, és lassú alakváltozás) - Hőtechnikai jellemzők (hővezetési tényező, hőtágulási együttható, tűzállóság) - Akusztikai jellemzők - Időállósági tulajdonságok (fagyállóság, korrózióállóság)	
---------------------	--	--

ahol:

- v: víz,
- c: cement,
- k: kötőanyag,
- konzisztencia: a betonkeverék mozgékonyságának, alakíthatóságának, bedolgozhatóságának, egyszóval kezelhetőségének jellemzője,
- stabilitás: a betonkeverék vízmegtartó képessége, azt jelenti, hogy a keverékkel végzett manipuláció során a víztartalom egyenletes eloszlású marad és vízvesztés nem következik be,
- eltarthatóság: a víz hozzáadásától számított időtartam, amelynek elteltével a betonkeverék megőrzi az eredeti bedolgozhatóságát,
- bedolgozási tényező: a beton előállításához felhasznált adalékanyagok halmaztérfogatai összegének és a belőlük készített, bedolgozott frissbeton térfogatának a hányadosa,
- levegőtartalom: a bedolgozott frissbetonban lévő levegő térfogata literben kifejezve vagy a frissbeton térfogatának arányában %-ban megadva,
- betonösszetétel: az egységnyi térfogatú bedolgozott frissbetonban lévő alkotóanyagok tömege,
- keverési arány: az egyes alkotók tömegének aránya a cement tömegéhez viszonyítva,
- testsűrűség: a test tömegének és térfogatának, azaz a pórusokkal együtt mért térfogatának a hányadosa,
- péptelítettség: cementpép tartalom, a cement és a víz térfogatának összege l/m³-ben, a bedolgozott frissbetonban; amely lehet: telítetlen, telített, túltelített.

1. táblázat: A betonok legfontosabb jellemzői [1] alapján saját kiegészítésekkel

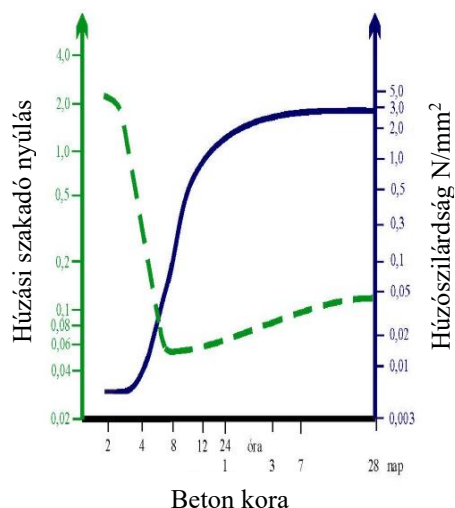
A fiatal beton szilárdulási folyamata sok tényezőtől függ, többek közt: cement fajtája és szilárdulása, mennyisége, víz-cement tényező, tömörítés és utókezelés módja, a beton hidratációs hőmérséklete, környezeti hőmérséklet, beton kora (a kötés kezdetétől az utószilárdulás végéig). Ezen tényezők közül is a legfontosabb a beton kötőanyagának, a cementnek a szilárdulása (hidratációja). A cement hidratációjának időbeni lezajlása szoros összefüggésben van a beton kötési és szilárdulási folyamatával. A cementpép (vízzel összekevert cement) nyomószilárdságának jellegzetes változása az idő függvényében az 1. ábrán követhető nyomon.



1. ábra: A cement kötésének és szilárdulásának alakulása az idő függvényében [1]

Zöld betonnak nevezik a beépített és betömörített, de még kötés előtt lévő friss betont, amelynek az ún. "zöld szilárdsága" ($0,1-0,3 \text{ N/mm}^2 - 0,5 \text{ N/mm}^2$) nem a hidratáció, hanem a cementpép folyáshatárának és az adhéziónak köszönhető. A zöld beton, a víz hozzáadásától számítva mintegy 6-12 óra között a képlékeny állapotból átmegy a fiatal betonra jellemző viszkoelasztikus (a viszkózus és az elasztikus viselkedés együttes megjelenése) állapotba, amelyet nagy relaxáció jellemez. A fiatal beton saját és gátolt alakváltozásából keletkező feszültségek nagy része még az első napon minimalizálódik, miközben azok az alakváltozások, amelyek a beton 48 órás kora után lépnek fel csak lassan mérséklődő feszültségek forrásai.

Fiatal betonnak a Vicat-féle kötés kezdetétől (az MSZ EN 196-3:1990 szerinti szabványos kötési idő vizsgálat Vicat-féle tűs készülékkel) általában 14 napos korig nevezzük a betont, amely már a megkötött és nem munkálható meg (tömörítés, formázás, felületképzés), átmenetet képez a friss és megszilárdult beton között.



2. ábra: A zöld és a fiatal beton húzási tulajdonságai [2]

A fiatal beton repedésérzékenysége a szakadó nyúlás mértékével korrelál. A 2. ábrán is jól látható, hogy a szakadó nyúlás eleinte igen nagy, de a beton dermedése után, 6-16 órán belül egy lokális minimumértéket ér el. A tapasztalatok szerint a húzási szakadási nyúlás minimuma és a beton húzószilárdsági görbéjének inflexiós pontja azonos időponthoz tartozik [3].

1.1.2 A betonok csoportosítása

A közönséges betonok csoportjába azokat a betonokat soroljuk, amelyeket szokványos technológiával (keverés, szállítás, bedolgozás) állítanak elő. Kiszáritott állapotban a szilárd beton $2000 - 2600 \text{ kg/m}^3$ testsűrűségű. A közönséges betonokkal szemben támasztott három legfontosabb követelmény a beton-konzisztenciája sűrűsége és nyomószilárdsága. További követelmény a vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek esetén az acélbetétek korrózió elleni védelme, ez tömör beton készítésével és megfelelő betonfedéssel érhető el. A közönséges betonoktól eltérő betonok lehetnek különleges rendeltetésű és különleges technológiával készült betonok, ezeket összefoglaló néven különleges betonoknak nevezzük. A különleges betonok csoportosítása a 2. táblázatban található [4].

A különleges rendeltetésű betonok	Különleges technológiával készített betonok
Vízáró beton	A beton szilárdulása hidegben
Kopásálló beton	Nagy szilárdságú cementek felhasználásában rejlő lehetőségek
Nagy nyomószilárdságú beton	Gőzölt beton

Nagy húzószilárdságú beton	Nagy tömegű beton
Könnyűbeton	Látszóbeton
Szálerősítésű beton	Dermesztett beton
Fagy- és sózásálló beton	Lövellt beton
Agresszív hatásnak ellenálló beton	Kolkrétbeton
Kis zsugorodású és kis kúszású beton	Prepakt beton
Sugárvédő beton	Pörgetett beton
Hőálló és tűzálló beton	Vákuum-, vibrovákuum beton
Átlátszó beton	Víz alatti beton
Öntömörödő betonok	Szövetszerkezetes építés
	No-fines (egyszemcsés) beton

- Gözölt beton: a beton szilárdítása gőzérleléssel gyorsítható. A frissbetont a környezeti hőmérséklet felett tartják (érlelik) 5-10 óra hosszan, majd vízpermettel történő szabályozott sebességű lehűtéssel és nedves utókezeléssel szilárdítják [5].
- Lövellt beton: cement, adalékanyag és víz homogén keverékének pneumatikus úton történő kijuttatása [6].
- Kolkrét beton: víz alatti betonozás esetén a beton tömörítési módszere, ahol a zsaluzatba elhelyezett kövek közé cementhabarcsot injektálnak [7].
- Prepakt beton: nagy tömegű betonozáskor a beton tömörítési módszere, ahol speciális összetételű habarcsot injektálnak az adalékanyag vázba.
- Pörgetett beton: kör keresztmetszetű vasbeton szerkezetek henger alakú sablonban való gyártása, a beton tömörítése pörgetéssel történik.
- Szövetszerkezetes építés: dermesztett beton technológia, leggyakrabban gipszbeton. A porózus gipsz zsaluzó táblák közé cementhabarcs kerül, amely a kötéshez felesleges víz gyors elszívásával a cementhabarcsot tömöríti és utókezel.
- No-fines (egyszemcsés) beton: speciális betonkeverék, amelyet kizárólag durva adalékanyagok, cement és víz felhasználásával állítanak elő.

2. táblázat: Különleges betonok csoportosítása [4] általam bővített

Fenti csoportosításban a nagy tömegű betonok külön szerepelnek, de a tömegbetonoknak többféle kritériumnak is meg kell felelni az alkalmazás függvényében (pl. fagyállóság, kopásállóság, vízzáróság, stb...). A továbbiakban a tömegbetont olyan speciális betonként

is értelmezem, melynek jellemzője, hogy a kötési szakaszban nagy hőmennyiség keletkezik a betontestben, és ez a hőmennyiség a beton tartósságra is hatással lehet.

1.1.3 Használati élettartam, szilárdság és a tartósság definiálása

A betonokkal szemben megfogalmazott szilárdsági követelmények mellett a szerkezet tartósságát is figyelembe kell venni. A tartósság lényegesen összetettebb fogalom és tágabb értelemben fejezi ki a betonokkal szemben támasztott követelményeket, mint a szilárdság. A tartósságot a betonszerkezet használati élettartamára kell értelmezni, ezen időtartam meghatározásához különböző számítási módszerek kerültek kidolgozásra. Az élettartam becslő számítási eljárások a szerkezet folyamatos ellenőrzésével, karbantartásával elérhető előírányzott időtartamot hivatottak megadni.

A betonszerkezet tartósságával kapcsolatos alapfogalom a használati élettartam, melynek definíciója a következő: *"az az időtartam, amely alatt a szerkezetbe épített beton teljesítőképessége megmarad a szerkezet teljesítőképességi követelményeit kielégítő szinten, feltéve, hogy a szerkezetet megfelelő módon karbantartják."* [9].

Fentiek szerint a szerkezet rendeltetésszerű használata mellett a feltételezett időintervallum meghatározása az alábbiak szerint alakul az Eurocode-ban [8] (3. táblázat).

Osztály	Előírt tervezési élettartam (év)	Példák
1	10	Ideiglenes tartószerkezetek (1)
2	10-25	Cserélhető tartószerkezeti részek, pl. darupálya tartók, saruk
3	15-30	Mezőgazdasági és hasonló szerkezetek
4	50	Épületek tartószerkezetei és egyéb szokásos tartószerkezetek
5	100	Monumentális épületek tartószerkezetei, hidak és más építőmérnöki szerkezetek
(1) Az olyan tartószerkezeteket vagy azok részeit, melyek újrafelhasználás céljából szétszerelhetők, nem kell ideiglenes szerkezeteknek tekinteni.		

3. táblázat: Előírt tervezési élettartamok [10]

A tervezett használati élettartam függ a szerkezet anyagától, funkciójától, elhelyezkedésétől egyaránt. Az időintervallum vége többféle módon adható meg:

- a használati élettartam végét jelentő határállapot definiálásával,
- az előírt tervezési élettartam évei számának megadásával,
- a szerkezet teljesítményjellemzőire vonatkozó megfelelőségi szintek kijelölésével, melynek átlépése jelenti a használati élettartam végét [11].

A fentiek értelmében a betonszerkezetre előírt szilárdság és tartósság fogalma az alábbiak szerint definiálható:

Szilárdság: "Az anyag vagy szerkezet teherviselő képessége, tehát a környezeti körülményektől lényegében független mechanikai jellemző." [12].

Tartósság: "A tartósság azzal az időtartammal jellemezhető, amelyen át az anyag vagy a szerkezet az adott, meghatározott mechanikai, fizikai és kémiai károsító igénybevételek között használható marad azokra a feladatokra (pl. teherbírás, szulfátállóság, stb.) amelyekre tervezték, azaz az előírt időtartamon át nem károsodik az előre meghatározottnál nagyobb mértékben." [12].

A tartósság a beton szilárdságának folyamatos fenntartását jelenti, a 3. táblázatban bemutatott példák szerint. A tartósságot az alábbi tényezők befolyásolják:

- szilárdság, fagyállóság, vízzáróság, kopásállóság,
- ellenállás a kavitáció (pl. kibetonozott folyómeder kopása) és egyéb ütésekkel szemben,
- ellenállás a betont érő külső víz (talajvíz, tárolt ill. folyóvíz) és hordalék agresszivitásával, valamint
- a belső (cementpép és adalékanyag közötti reakciók) vegyi hatásokkal szembeni ellenállás,
- mozgások, vagy megakadályozásuk esetén feszültségek ill. repedések keletkezése a betonban amiatt, hogy eltérő hőtágulású ill. eltérő zsugorodású és duzzadású anyagokat tartalmaz.

A definíciókból egyértelműen kiderül, hogy a szilárdság és a tartósság közötti legnagyobb különbség, hogy míg a szilárdságot a szerkezettel szembeni teherviselő képességre korlátozzuk, addig a tartósság a környezeti hatásoknak való ellenállást veszi figyelembe.

A szerkezet tartóssága az alábbi módokon biztosítható:

- védő-, csillapító rendszerek alkalmazásával,
- anyaghasználattal, mely megfelelő karbantartás mellett a használati élettartam alatt nem megy tönkre,
- szerkezeti méretek és/vagy anyagmennyiségek biztosításával, melyek kompenzálják a károsodást a tervezett használati élettartam alatt olyan szerkezeti elemek alkalmazásával, amelyek ugyan rövidebb élettartamúak a tervezett használati élettartamnál, de egy vagy több alkalommal egyszerűen cserélhetők [12].

A felsorolt megoldások önmagukban és együttesen is alkalmazhatók, de összhangban kell lenniük az ellenőrzési és karbantartási lehetőségekkel.

1.1.4 A betonok karbantartási és ellenőrzési módszerei

A betonszerkezetek tartósságát a terhelésből származó igénybevételek mellett a környezeti hatások is befolyásolják. A tervezett használati élettartam akkor biztosítható, ha a beton, vasbeton, feszített vasbeton szerkezet használata és fenntartása szabályozott. Az üzemeltetés építmény típusonként eltérő, melyet az üzemeltetési utasításban szabályoznak (túlterhelés, hídhasználat korlátozása) [12].

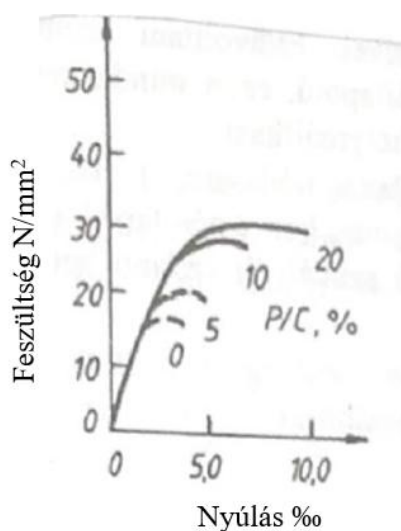
A szerkezet tartóssága a gondos tervezés, építés mellett megfelelő üzemeltetés és ellenőrzés mellett biztosítható. Napjainkra kialakult nézet szerint tartós, korrózió ellenálló beton, vasbeton szerkezeteket kell építeni, illetve azokat a korrózió ellen védeni kell. Általánosan elmondható, hogy a szerkezetek védelme kétféle lehet: megelőző (primer) és megszüntető (szekunder). Az első a megfelelő anyagválasztást és szerkezeti kialakítást jelenti elsősorban, az utóbbi pedig a már a kialakult károsodások megszüntetésére koncentrál.

A primer, azaz megelőző védelem már a tervezési dokumentációban szerepel, amennyiben ismertek a szerkezeteket érő hatások (igénybevételek, terhelések, környezeti tényezők). A leghatásosabb és leggazdaságosabb védekezés a korrózió ellen a lehető legtömörebb beton készítése és a betontechnológiai követelmények maradéktalan betartása. A követelmények ez esetben: a beton anyagainak és összetételének helyes megválasztása, ill. előállítása, utókezelése, megbízható ellenőrzés beépítés előtt és után, valamint a megfelelő betontakarás, végül a szerkezet szakszerű fenntartása [13].

Fentiek értelmében fontos az épületek szerkezeti és anyagszerkezeti diagnosztikája, mert csak ezen eredmények tükrében lehet felmérni a tényleges meghibásodások veszélyeit.

" Alapszabályként kell kezelni, hogy másodlagos megelőző védelmet csak anyagtanilag, szerkezeti és funkcionálisan is jól ismert beton- és vasbeton műtárgyakon szabad kialakítani. " [8]. A betonfelület előkészítése, mind az újonnan épült szerkezetek, mind a korosabbak esetében kellő gondossággal kell, hogy megtörténjen. A védőanyag fogadására alkalmas felületet akkor tekinthetjük megfelelőnek szilárdság kapcsolati szempontból, ha a beton tapadó-húzószilárdsága legalább $1,5 \text{ N/mm}^2$. Régebbi szerkezet esetében a felületi hibákat el kell távolítani és meg kell tisztítani [12].

A másodlagos, megelőző védelem alatt a felületvédelmi rendszerek alkalmazását értjük. Ez esetben is fontos a primer védelem alkalmazása, de a szigorú követelmények betartása mellett is elkerülhetetlen a korróziót okozó anyagok bejutása a betonba. A korrózió elleni védekezés módját, annak agresszivitásának (sózás, légszennyezés) mértékétől függően kell megválasztani. Tehát a primer védelem mellett a szekunder védelmet leginkább a várhatóan agresszív korrózióknak kitett szerkezetek esetén kell alkalmazni [9]. A felületvédelmi rendszerekkel szemben támasztott követelmények teljesülése mellett a rendszer anyagának megválasztása is fontos. Legelterjedtebb a polimerdiszperzióval módosított cement kötésű védőanyag (PCC rendszer). A PCC rendszer feszültség – nyúlás diagramja a 3. ábrán látható. A felhordott bevonatnak 5-15 % -os műanyag adagolás mellett repedésáthidaló képessége lesz, így a cementpép σ - ϵ diagramja lineárisan rugalmasból rugalmas-képlékennyé változik [12].

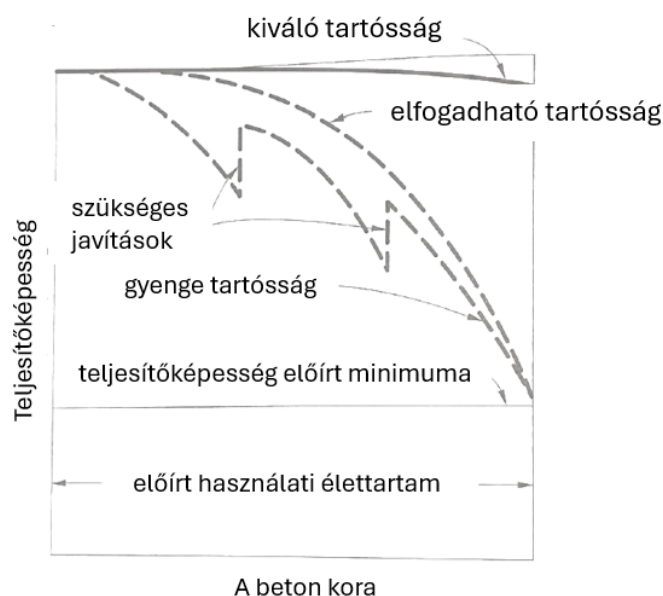


3. ábra: Egy PCC rendszer feszültség – nyúlás diagramja

Az elsődleges és másodlagos védelem mellett a szerkezet megerősítésére is szükség lehet. A szerkezetek teherbírásának növelésére abban az esetben van szükség, ha az eredeti szerkezet a használatból és a korrózióból eredő károsodások következtében megváltozott terheket nem képes viselni, továbbá a meghibásodás is lehet olyan mérvű, hogy csak a csökkent teherbírás pótlásával lehet a szerkezet rendeltetésszerű használatát biztosítani [14].

A megépített beton és vasbeton szerkezetek az MSZ EN 206:2014 „Beton. Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség” szabvány szerint készülnek, de teljesítőképességük a tervezett élettartam alatt mindenképpen csökken.

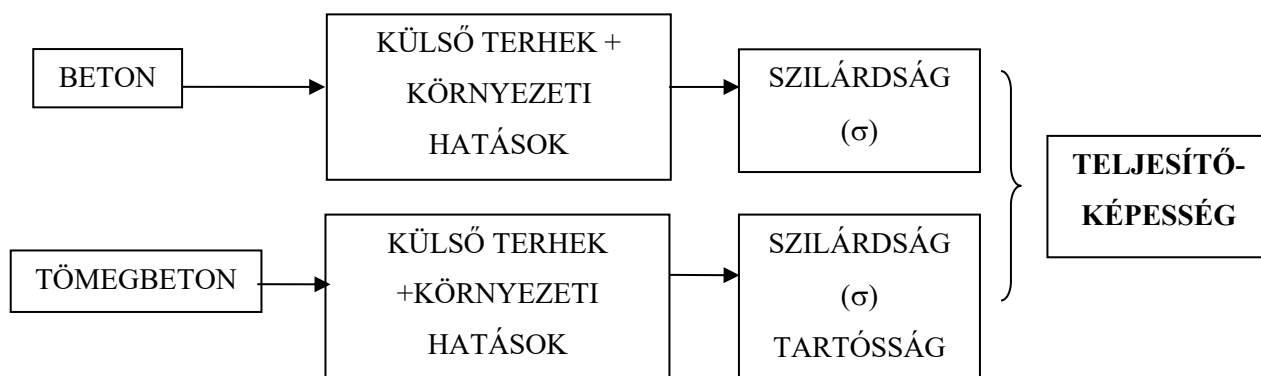
E folyamatot a szerkezet ellenőrzésével, szükséges esetekben felújításokkal, javításokkal kell mérsékelni. A felújítás szüksége és mértéke az előírt használati élettartam alatt többször is felmerülhet. A betonszerkezetek teljesítőképességének csökkenése a beton korának a függvényében a 4. ábrán látható.



4. ábra: A betonszerkezetek teljesítőképességének csökkenése a korrall [14]

A betonokkal szemben támasztott komplex követelmény a teljesítőképesség. Napjaink teljesítőképesség alapú beton szemlélete szerint a beton szövetszerkezetének minősége a meghatározó. A szövetszerkezetre leginkább a kis víz áteresztőképességű cementkő kialakítása van hatással, amely a megfelelően kicsi víz/cement tényező megválasztásával és a kellő mértékű hidratáció mellett érhető el [15].

A betonok/tömegbetonok és a velük szemben támasztott követelmények közötti összefüggéseket a 5. ábrán foglaltam össze:



5. ábra: A betonok/tömegbetonok és a velük szemben támasztott követelmények közötti összefüggések (általam szerkesztett)

1.2 Tömegbetonok

1.2.1 Tömegbeton fogalma

A tömegbeton – mint fogalom – meghatározása többféle módon történhet.

Az Amerikai Beton Intézet (ACI:American Concrete Institute) által előírt definíció: *"Bármely olyan térfogatú beton, amely elég nagyméretű ahhoz, hogy a cementek hidratációs hőfejlődés számottevő legyen, és ennek függvényében intézkedés szükséges a térfogatváltozás és a zsugorodás miatti repedésképződés csökkentésére."* [16].

Viszont az FDOT (Florida Department of Transportation) szerkezettervezési Irányelveiben: *„Olyan beton, mely méreteinél fogva megkíván bizonyos, a repedések minimalizálása céljából történő, a hőfejlődést, és a velejáró térfogatváltozást korlátozó intézkedéseket.”*[17]

Dr. Salem Georges Nehme szerint: *"Bármely szerkezet, amelynek vastagsága több mint 40 cm."* [17] vagy Dr. Balázs György szerint: *"Tömegbetonoknak az olyan speciális rendeltetésű betonokat nevezzük, amelyeknek az erőjátékát a cement kötése és szilárdulása kezdeti szakaszában keletkező hidratációhő - annak nagy méretei miatt - döntően befolyásolja."* [4].

Egyben azonban megegyeznek a meghatározások: a nagytömegű betonok kötési és kezdeti szilárdulási folyamata során keletkező hidratációs hő „kezelése” döntően befolyásolja a végső szerkezet szilárdságát. Tehát a cement hidratációhője miatt szilárduló

tömegbetonban nagy hőmérséklet és nagy hőmérsékletkülönbségek alakulhatnak ki, amely káros belső feszültségekhez, alakváltozásokhoz és repedésekhez, vagyis a szerkezet tönkremeneteléhez vezethetnek.

A tömegbetont a következőképpen definiálom: olyan különleges készítési technológiát igénylő beton, amelynek a hidratációs hőfejlesztése nagymértékű, és az ebből adódó térfogatváltozások okozta repedések kialakulása a szerkezet tartósságát veszélyezteti.

A tömegbetonon belüli hőmérsékletek és hőmérsékletkülönbségek az alábbi tényezőktől függenek (részletesen a 2. fejezetben ismertetem): külső tényezők, beton alkotóinak minősége és mennyisége, a megszilárdult beton fizikai tulajdonságai, betontechnológiai tényezők.

1.2.2 Tömegbetonok felhasználási területei

A tömegbetonokat rendeltetésüket tekintve megkülönböztethetünk:

- vízépitési tömegbetonokat (völgyzáró gátak, vízi erőművek, vész- és záportározók),
- felúszás elleni szerkezetek (talajvízben),
- nagy terhelésű szerkezetek alapozásai,
- sugárvédő- és hidrátbetonok,
- egyéb létesítményeket (hídfők, pillérek, életvédelmi létesítmények, óvóhelyek, mezőgazdasági silók, hőerőművi kémények) mélyépítési létesítmények (alagutak, földfelszín alatti tömegközlekedési útvonalak).

A vízépitési tömegbetonokkal szemben támasztott legfőbb követelmény a tartósság, amíg az egyéb létesítményeknél rendszerint egy előre meghatározott szilárdsági érték jelenik meg igényként [4].

1.2.3 A tartósság növelése (tervezéssel, építéssel)

A tartósság növelésének módját már a tervezésnél figyelembe kell venni, az alábbi szempontok alapján:

- tartósságra és élettartamra kell tervezni,
- fenntartási igény minimalizálása és a gazdaságosság figyelembe vétele,
- gyenge helyek (víznyelő, munkahézag, elemcsatlakozás) számának minimalizálása,

- üreges terek víztelenítéséről gondoskodni kell,
- üreges terekben a szennyeződés ne gyűljön össze,
- földdel érintkező szerkezetek legyenek viszonylag nagy méretűek,
- betontechnológiai előírások betartása (víz-cement tényező, maximális és minimális cementtartalom és cementfajta, betonfedés),
- gondos, a szerkezetnek megfelelő utókezelés biztosítása,
- sózásnak kitett betonfelületek tömörségét, betonfedését biztosítani kell [12].

Az építés során is befolyásolható a betonszerkezetek tartóssága. Az alkotóanyagok - különös tekintettel az adalékanyagra, cementre és a kiegészítő anyagokra - megfelelő választásával növelhető a betonszerkezet tartóssága.

További lehetőség a tömör beton készítése, mellyel az acélbetétek korróziója csökkenthető, vagy el is kerülhető. Az acélbetétek korrózióját az alábbi három tényező együttes fennállása okozza, amennyiben az egyik, vagy másik hiányzik, a korrózió nem következik be:

- a beton PH-ja az acélbetét környezetében 9 alá csökken, (a PH érték csökkenésével a vasbeton szerkezetek acélbetéteit a korróziótól védő lúgos kémhatása csökken vagy megszűnik)
- a beton a víztartalomtól függően elektromosan vezetőképes,
- oxigén jut az acélhoz.

Az acélbetét korrózióját okozó kloridionok annál nehezebben, illetve később érik el az acélbetétet, minél tömörebb és vastagabb a betonfedés, másrészt az acélkorrózió annál lassúbb, minél kevesebb oxigén és nedvesség jut az acélbetéthez. Az acélkorrózió megelőzhető tömör beton készítésével, megfelelő betonfedéssel [12].

1.3 Tömegbetonban létrejövő repedések kialakulása és elkerülése

A vékony és közepes betonszerkezetek esetében a cement hidratációja során keletkező hő minimális [18]. A szerkezet repedésmentes kialakítása a megfelelő utókezelés alkalmazásával biztosítható.

A tömegbetonok bármely definícióját is tekintjük, a cementek hidratációs hőjéből kialakuló térfogatváltozások okozzák a fő problémát. A térfogatváltozás által okozott repedéskockázat elemzése, ellenőrzése fontos mérnöki feladat [19].

A vastagabb szerkezetek, tömegbetonok belsejében közel adiabatikus viszonyok vannak, a beton és környezete közötti korlátozott hőcsere miatt. Ennek következtében a tömegbeton szerkezet belsejében a hőmérséklet elérheti az 50 - 70 °C-t is [18].

A vastag szerkezetek (tömegbetonok) repedési veszélyének oka, hogy az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból származó húzó jellegű belső feszültség meghaladja a beton saját húzószilárdságát. A gátolt alakváltozás okán fellépő feszültségek hatására átmenő repedések kialakulásával is kell számolni. Az EUROCODE 2 szerint a betonban normál körülmények között keletkező hőhatások okozta felületi repedések elkerülése érdekében a szerkezet középpontja és felülete közti hőmérsékletkülönbség nem lehet nagyobb, mint 20 °C [20]. Egyes kutatók szerint ez a hőmérsékletkülönbség a 25 °C, de akár a 35 °C-ot is elérheti a szerkezet károsodása nélkül [21]. Ennek a paraméternek a rögzítése fontos a kutatás szempontjából, mind az analitikus, mind a diszkrét és végelelemes modellezési eljárásban egyaránt.

Betonozni +5°C és +30 °C hőmérsékleti határok között szabad. A mértékadó hőmérséklet (T_m) a következő képletből számítandó:

$$T_m = \frac{2T_b + T_1}{3}$$

ahol:

T_b – a bedolgozott friss beton hőmérséklete, °C

T_1 – a várható napi középhőmérséklet, illetve az előző napi tényleges átlag hőmérséklet (árnyékban mért legnagyobb és legkisebb hőmérséklet átlaga) [22].

A megfelelő betonozási hőmérséklet biztosítása mellett a repedések kialakulásában más tényezők is szerepet játszhatnak. Meg kell különböztetni a belső feszültségekből eredő ill. a külső hatások okozta repedések kiváltó okait. Az így létrejött repedések kéreg-, vagy átmenő repedések formájában jelennek meg. A 4. táblázatban a tömegbeton szerkezeteken megjelenő repedések kiváltó okait csoportosítottam.

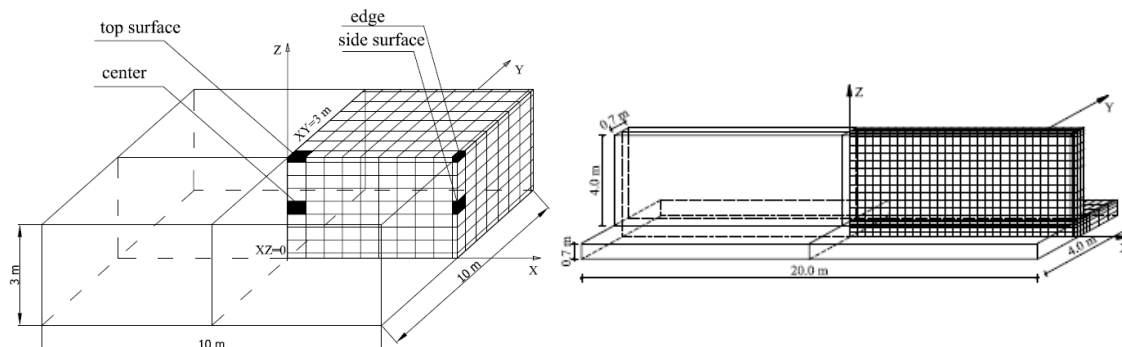
REPEDÉSEK KIALAKULÁSÁNAK OKAI				
BELSŐ HATÁSOK	KÖTÉS ELŐTT KIALAKULÓ		KÖTÉS UTÁN KIALAKULÓ	
	Képlékeny állapot	Képlékeny ülepedés	Fizikai/kémiai hatások	Acélbetétek korróziója
		Képlékeny zsugorodás		Cement karbonátosodás
				Alkáli-adalékanyag reakció
				Száradási zsugorodás
	Hőmérsékleti hatások	Korai fagykár	Hőmérsékleti hatások	Fagyás-olvasztás ciklus
		Téli / nyári betonozásból adódó hőmérséklet- különbség		Évszaktól függő hőmérsékletváltozás
				Egyenlőtlen hőmérsékletek a beton belseje és felszíne között
			Technológiai	Szakaszos építés, munkahézag
				Utókezelés módszere
KÜLSŐ HATÁSOK	Szerkezeti mozgások	Zsaluzat mozgása	Statikai / mechanikai tulajdonságok	Tervezési vagy túlterhelési igénybevételek
		Állványzat mozgása		Húzó-, hajlító-, nyírófeszültség
		Talajmozgás		Talajmozgás
				Kifáradás

4. táblázat: A tömegbetonokban kialakuló repedések kiváltó okai

A tömegbetonok fogalmának tisztázása, valamint a repedések kiváltó okainak megismerésén túl további differenciálásra van szükség. A beton készítésének folyamatait tekintve két fő fázist kell megkülönböztetni. Első a kötési (kötés előtti és utáni), második a szilárdulási (korai szilárdulás, szilárdulás, utószilárdulás) folyamat. Főként a kötési és a korai szilárdulási folyamat esetén a beton különböző tulajdonságait kell vizsgálni, ill. figyelembe venni, ha a szerkezet tartósságát tartjuk szem előtt. A fenti 4. táblázatban a kötés előtti és utáni repedéskiváltó okok kerültek összefoglalásra.

A repedések egyik fő oka a beton korai életkorában bekövetkező térfogatváltozások. Ezen térfogatváltozások a hőmérsékletkülönbségből és a nedvességtartalom csökkenéséből

adódnak. A repedések kialakulásának előrejelzését vissza lehet vezetni a tömegbeton szerkezetekben kialakuló hőmérsékleteloszlásra. B.A Klemczak a repedésképek feltérképezéséhez két alapvető szerkezet vizsgált.



6. a, b ábra: Tömegbeton szerkezetek mezőkre osztása szimulációs modellezéshez
a, alaplemez, gerenda; b, felmenő falszerkezet [19]

A talajon fekvő tömegbeton alaplemez, gerenda (6.a ábra) ill. a felmenő falszerkezetek (6.b ábra) esetében is más-más okok vezethetnek a repedések kialakulásához. [23].

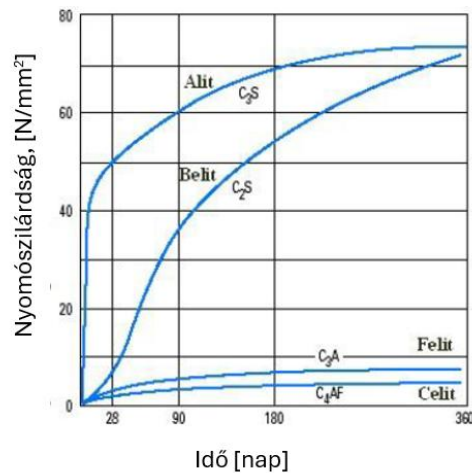
Mindkét esetben a modellt inhomogén szerkezetként kell figyelembe venni. Ennek oka, hogy a nagy vertikális (falszerkezet) ill. horizontális (alaptest) kiterjedésű betontömbök esetében különböző hőmérsékletű és nedvességtartalmú mezők alakulnak ki. Az egyes mezők közel azonos paraméterekkel rendelkeznek, de egymáshoz képest már jelentősebb eltérést mutatnak. Ez a felosztás egyértelműsíti a végelem-módszernél alkalmazott szimulációs modell méreteit és kezelhetőségét is [19].

1.4 A beton szilárdulása során fejlődő hidratációs hőmennyiség

A hidratáció során oldhatatlan, szilárd hidráttermék keletkezik. Ezek a klinkerásványok: alit (trikalcium-szilikát), belit (dikalcium-szilikát), celit (tetrakalcium-aluminát-ferrit), felit (trikalcium-aluminát). A cementhidratáció modelljét 1974-ben Powers fogalmazta meg, több kutató tovább fejlesztett a későbbiekben. Általános egyetértés alakult ki abban, hogy a beton szilárdulásának egyik legfontosabb befolyásoló tényezője a cement fajtája [24].

1.4.1 A portlandcement hidratációja

A cement vízzel való keveredése után a kalciumhidroxid-kalciumszilikát-kalciumaluminát gélrendszerből szilárd cementkő alakul ki.



7. ábra: A klinker fázisok hidratációs termékének szilárdulási folyamata [25]

A cementszemcse felszínén létrejövő gélrendszerrel induló hidratáció fokozatosan a szemcse belseje felé halad, néhány mikrométer vastagságú rétegen megy végbe a folyamat. A cement őrlési finomsága a reakcióképes fajlagos felületét tekintve befolyásolja a hidratációban résztvevő klinkerásványok részarányát, ennél fogva a cement kötőerejét, későbbi szilárdságát is befolyásolva.

Az egyes klinkerásványok hidratálódása időben eltérő, nyomószilárdságuk is változó. A klinker fázisok hidratációs termékének szilárdulási folyamatát a 7. ábra mutatja.

A hidratációs termékek kialakulása hely- és vízigényes, így a 0,32-0,36 alatti víz-cement tényező gátolt hidratációt eredményezhet. A víz-cement tényező a frissbeton víz- és cementtartalmának tömegaránya, amely a beton nyomószilárdságának meghatározója. A gélrendszer duzzadása a vízvesztés következtében zsugorodássá változik a cementkővé szilárdulás során. A zsugorodási folyamat lefutása vezethet a szerkezetben megjelenő repedések kialakulásához.

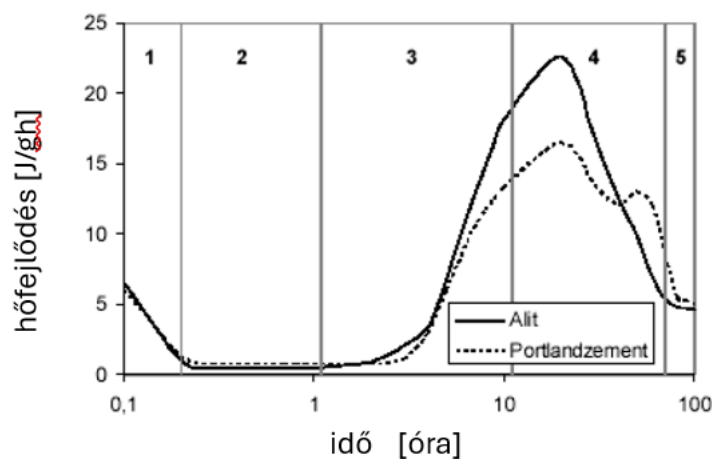
„A hidratációs fok a levegő relatív nedvességtartalmának, cementfajtának és a test ún. kiszáradó átlagos vastagságának a függvénye. A test kiszáradó átlagos vastagsága alatt a test kétszeres térfogatának és kiszáradó felületének hányadosa értendő.” [24]. A hidratáció évekig eltartó folyamatát jellemezzük ezzel a mérőszámmal, ahol a hidratációs fok 0 a hidratáció kezdetén és 1 a teljes hidratáció esetén [24].

A cementhidratáció több tényezőtől befolyásolt folyamat, így annak lefolyására több modellt is készítettek korábban. A szabványos próbatest tárolására épülő modellek viszont a próbatest méretét tekintve nem vonatkoztathatóak egyértelműen a tömegbetonokat leíró modellekre. A fejlődő hidratáció hő mennyisége a cement összetételétől függ. A klinkerásványok közül a trikálcium-alumináté a legnagyobb, a dikalcium-szilikaté a

legalacsonyabb. A portlandcementek hidratációhőjét kiegészítő anyaggal csökkentik. Tömegbetonok és nyári betonozás alkalmával a mérsékelt hőfejlesztésű cementek alkalmazása a gyakori, így a beton szilárdulási üteme és vízigénye csökkenthető és konzisztenciája (frissbeton mozgással szembeni ellenállását, belső sűrűlődését, alaktartását fejezi ki) növelhető.

A hidratáció sebessége és a hőfejlődés üteme nem egyenletes, öt fő szakaszra oszthatjuk általában. Ezt a folyamatot a 8. ábra mutatja be.

- Az első szakasz nagy hőfejlődéssel járó kb. negyed órás időtartamú, amely alatt megkezdődik az elsődleges ettringit (trikalcium aluminát) képződés.
- A második szakasz néhány órán át tart és lassú hőfejlődéssel jár, ekkor még a frissbeton bedolgozható.
- A víz hozzáadásától számított 4-8 órában kezdődő nagy hőfejlesztésű szakaszban megindul a kristályképződés (kalcium-szilikát-hidrátok és kalcium-hidroxid képződése). Folytatódik az elsődleges ettringit képződés, kialakul a korai szilárdság.
- A negyedik szakaszban csökken a hőfejlődés, kb. 1 napos korban megindul a tetrakalcium-szulfo-aluminát-hidrát (monoszulfát) képződése, ez az erőteljes szilárdulás általában 28 napos korig tart.
- Az utolsó szakasz az éveken át tartó utószilárdulás, amely nem jár hőfejlesztéssel.



8. ábra: Hőfejlődés folyamata a hidratáció során [24]

A különböző cementek hidratációhő fejlesztése az alábbiak szerint alakul:

- | | |
|-------------------------------------|-------------|
| - portlandcement (CEM I) | 375-525 J/g |
| - kohósalakportlandcement (CEM III) | 355-440 J/g |
| - traszportlandcement | 315-420 J/g |

- aluminátcement (pl: bauxitcement)

545-585 J/g [24]

A fenti értékek igen nagy intervallumban mozognak, így a tömegbetonok készítésekor fejlődő hidratációhő mennyisége csak becsülhető.

1.4.2 A tömegbetonok hidratációhő okozta repedései

1.4.2.1 A kéreg- és átmenő repedések fogalma

A hidratációhő definíciója: Amikor a cementet vízzel összekeverjük kémiai reakció jön létre, melyet hidratációnak, és a hidratáció során felszabaduló, tömegegységre vonatkoztatott reakcióhőt hidratációhőnek nevezünk [4]. A hőfejlesztés összmenyisége függ a cement fajtájától és a beton kezdeti hőmérsékletétől [17].

A hidratáció exoterm (hőtermelő) folyamat, melynek hatására a beton felmelegszik. Betontechnológiai szempontból ez a felmelegedés nem mindig káros, téli betonozás esetén például hasznos is lehet.

Vastag falú szerkezeteknél a felmelegedés és lehűlés hatására bekövetkező egyenlőtlen hőmérsékleteloszlás, az egyenlőtlen kiszáradás miatt egyenlőtlen zsugorodás léphet fel. A gátolt alakváltozás miatt a szerkezetben feszültségek keletkeznek és a beton repedéséhez vezet. A betonok készítésének, utókezelésének a célja, hogy ezen repedések kialakulását minimalizáljuk, keletkezését megelőzzük.

A feszültség kialakulásának két fő oka van:

1. zsugorodás: a betonból a szilárdulás alatt a keverővíz távozik, így a szerkezet zsugorodik. A kötési idő alatt a zsaluzat és a folyamatos utókezelés (leggyakoribb módja a vízzel való hűtés) hatására fellépő keverővíz mennyiség távozása nem vezet számottevő zsugorodáshoz, ezáltal annak mértéke sem vezet a szerkezet nagymértékű károsodásához [4].

2. egyenlőtlen hőmérsékleteloszlás: a betonban kialakuló hőmérsékleti feszültségek szempontjából figyelembe kell venni, hogy a beton korával nő a beton húzószilárdsága és rugalmassági modulusa. A vastag falú szerkezetekben kialakuló időfüggő feszültségállapot következményei igen változatosak lehetnek [4].

1.4.2.2 Kéregrepedés

A bezsaluzott betonfalban egyenlőtlen hőmérsékleteloszlás alakul ki. Mivel a beton nem alakváltozhat szabadon, ezért benne feszültségek keletkeznek. A szerkezetre ekkor külső erő nem hat, ezért a belső erőknek (húzó- és nyomóerő) kell egyensúlyban lenni.

A kialakuló feszültség számításának egyszerűsített módja: az egyenlőtlen hőmérséklet ábráját területileg kiegyenlítjük. A fal szélén a ΔT hőmérséklet különbségből húzófeszültség keletkezik (9. ábra).

$$f_{ct} = \alpha \Delta t E_{ot}$$

A képletben:

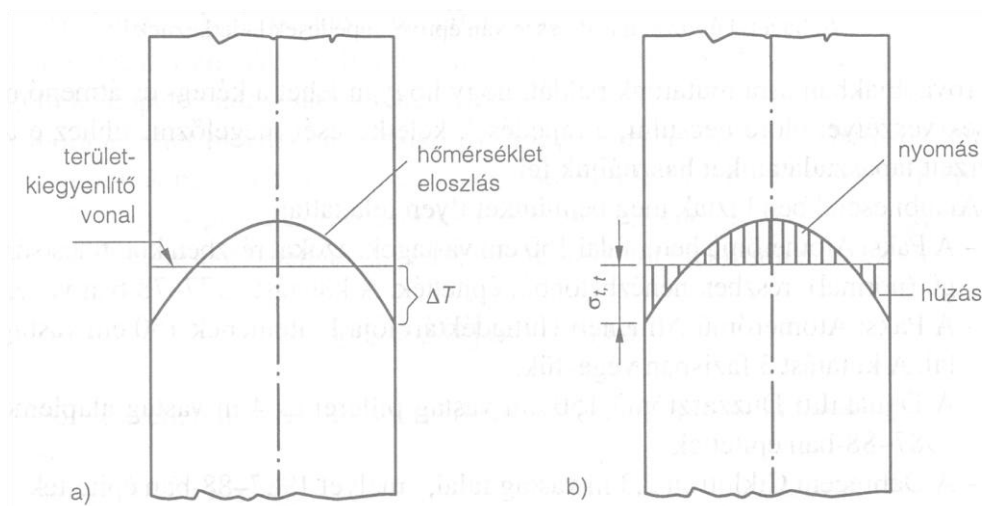
f_{ct} = a központos húzószilárdság, [MPa]

α = a beton hőtágulási együtthatója, [1/°C]

Δt = a területkiegyenlítéssel nyert hőmérséklet [°C]

E_{ot} = a beton kezdeti rugalmassági modulusa húzásra, [MPa] [4]

Ha a betonban kialakult húzófeszültség - a vizsgált időpontban - nagyobb a maximális húzószilárdságnál, akkor a beton megreped. Ez a kéregrepedés nem mély, de el kell kerülni, mert a repedések a beton károsodását elősegítik.



9. ábra: A kéregrepedés fogalma

a) egyenlőtlen hőmérséklet a falban; b) a húzó és nyomófeszültségek [4]

A 9.a) ábrán látható ΔT érték a hőmérsékleteloszlás görbájének meredekségétől függ. A görbe maximumának és minimumának a területkiegyenlítő vonalhoz viszonyított távolságát a hőmérsékleti gradiens határozza meg.

A hőmérsékleti gradiens nagysága befolyással van a kéregrepedések kialakulására. A hőmérsékleti gradiens vektormennyiség, melynek komponensei a $T(x,y,z)$ hőmérsékleti tér helykoordináták szerinti parciális deriváltjaival fejezhető ki:

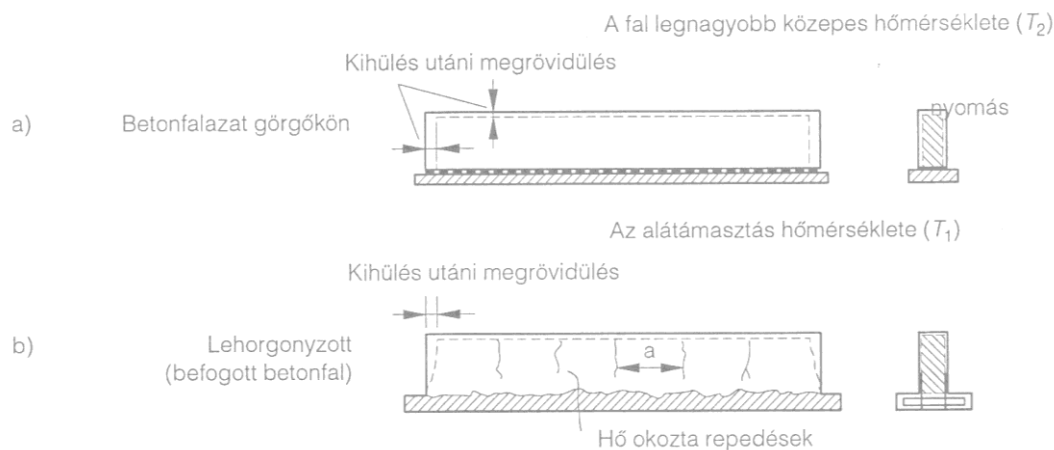
$$\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k}$$

A gradiens vektor a legnagyobb hőmérséklet növekedés irányába mutat, és a vektor abszolút értéke megadja, hogy ebben az irányban milyen a hosszegységre eső hőmérséklet növekedés. Ennek megfelelően dimenziója K/m vagy °C/m.

A tömegbetonok mag- és felszíni hőmérsékletének ismerete fontos, mivel segítségével a kéregrepedések kialakulásának a veszélye prognosztizálható.

1.4.2.3 Átmenő repedés

Az átmenő repedések általában a több szakaszban betonozott szerkezetek esetén alakulhat ki (pl.: híd alaptest és pillér). Ha az első szakaszban készített beton már a környezeti hőmérsékletre hűl és a ráépített szerkezet az előzővel össze van építve (nem görgőkön telepített), akkor a lehorgonyzásból gátolt alakváltozás jön létre. Ennek következtében a teljes falon átmenő repedések keletkeznek (10. ábra).



10. ábra: Az átmenő repedés fogalma a.) az alaptest és a felmenő fal között golyócsapágy van, a felmenőfal szabadon alakváltozhat; b.) ha a fal és az alaptest össze van építve, repedések keletkeznek [4]

A mérnöki gyakorlat számára fontos tudni, hogy a repedés milyen mértékű (átmenő vagy kéreg) illetve, hogy a megengedett mértéken belüli vagy meghaladja azt. A jelenség vizsgálata érdekében a kutatók számos laboratóriumi vagy építéshelyszíni kísérletet végeztek el, illetve a jelenség leírására számos numerikus modellt készítettek.

1.4.3 A betonszerkezetek hőmérsékleteloszlását befolyásoló tényezők

1.4.3.1 Külső tényezők

A külső tényezők betonszerkezetekre gyakorolt hatását az alábbiakban foglalom össze. A tényezők külön-külön is nagymértékben befolyásolják a repedésveszély kialakulását, de az egyidejű fennállásukkal is számolni kell a kivitelezéskor. Továbbá figyelembe kell venni, hogy a szerkezeti elemek elhelyezkedése a környezeti tényezőkön túl is jelentőséggel bír, hiszen nem mindegy, hogy a külső hatások milyen mértékben érik a szerkezetet. A betonszerkezet lehet talajfelszín alatti (például alagutak, alaptestek) vagy talajfelszín feletti (például gát, hídpillér). Az első esetben a talaj kezdeti hőmérséklete a másodikban pedig a környezet hőmérséklete vehető figyelembe a kivitelezés megtervezésekor.

A szél hatása, a beton zsályozatlan, azaz szabad felszínén a hőmérsékletet csökkentheti. A hőmérsékletcsökkenés függ a szélesebségtől, a környezeti léghőmérséklettől, valamint a napsugárzás mértékétől. A felszín és a betontest belseje között kialakuló hőmérsékletkülönbség megnő, így feszültség keletkezik a betonban. A kutatások szerint a szél hűtő hatása a zsályozattal borított felületeken is érvényesül [4]. Összességében tehát a szél a konvekciót módosítja, ezáltal befolyással van a kialakuló hőmérsékletekre [27].

A betonban kialakuló hőmérsékleteket a napsugárzás intenzitása is befolyásolja. A hőmérsékleti számítások esetén a napsugárzást forrásként tekinthetjük a napsugárzásnak kitett felületrészeken. Figyelembe kell venni az évszakot is, hogy nyári betonozást (betonhőmérséklet 25 °C) vagy őszi időben (betonhőmérséklet 10 °C) valót tételezünk fel.

A forrástag számítása: $q_n = A_N I_N \frac{\Delta A}{\Delta V}$

ahol: A_N : a felület napsugárzásra vonatkozó abszorpciós tényezője

I_N : a napsugárzás intenzitása

ΔV : a vizsgált térfogatelem nagysága [4]

Figyelembe kell venni a megépítendő szerkezet tájolását is, hiszen a nyári betonozás esetében - betartva a nyári betonozás szabályait - a napsugárzás asszimmetrikusan éri a betonszerkezetet kritikus kötési idő alatt [27].

A külső környezeti hőmérséklet és hatásainak elemzésekor meg kell különböztetni téli és nyári betonozást. A téli időszakban megnő a felszín és a beton belsejében mért hőmérsékletek közti különbség, míg a nyári időjárási körülmények között kevésbé. A léghőmérsékletet a maximális betonhőmérséklet megállapításánál is számításba kell venni.

Ennek fényében kell mind az alkotóanyagok bedolgozási hőmérsékletét, a cementminőséget megválasztani és az utókezelést megkezdeni.

A szerkezet belsejében a környezettel való hőcsere korlátozott. Ennél fogva a kezdeti hő megreked ott és hozzáadódik a beton bedolgozási hőmérsékletéhez, melynek hatására a hőmérsékletnövekedés jelentősen fokozódik.

A párolgás a keverővíz távozását jelenti a betonfelszínről. Ennek mértékét és időbeni lefolyását szabályozott körülmények között kell tartani, mellyel megelőzhető a párolgás okozta korai kiszáradása a betonnak. A párolgást okozó tényezők:

- a beton felülete feletti áramlási viszonyok,
- a levegő páratartalma és hőmérséklete,
- a felület hőmérséklete,
- a zsámozott és zsámozatlan felületek aránya,
- az utókezelés megkezdésének időpontja és technológiája [17].

A talajjal való érintkezés a nagy kiterjedésű alaptestek esetében is figyelembe veendő tényező, amely befolyásolja a hőmérsékleteloszlást, illetve a hűlési folyamatot. Ahogy a külső környezeti hőmérséklet, úgy a talaj kezdeti hőmérséklete is meghatározó [19]. Az alaptest mélységétől függően a különböző vastagságú alaplemezekben szintén kialakulnak az eltérő hőmérsékletű és nedvességtartalmú mezők.

1.4.3.2 Beton alkotóelemeinek mennyisége és minősége

A portlandcementet alkotó klinkerásványok főleg szilikátásványokból épülnek fel. A különböző cementtípusok az alkotóelemeket különböző mennyiségben tartalmazzák. Megkülönböztetünk tiszta valamint heterogén (hidraulikus kiegészítő anyagot tartalmazó) portlandcementet.

A cement típusa: Általános megállapítás, hogy a heterogén portlandcementek (CEM II, III, IV és V cementfajták) hidratációhője mindig kisebb, mint a tiszta portlandcementeké, amelyek ásványi összetétele közel azonos. A hőmérsékleti feszültségek kialakulása szempontjából a cement fajtájának (ásványi összetétel, őrlési finomság), a cementtartalomnak, a cement korának van a legnagyobb szerepe.

A portlandcement fő klinkerásványai a C_3S (alit), C_2S (belit), C_3A (felit) és a C_3AF (celit), mely összetevők különböző módon vesznek részt a cement hidratációjában. A hidraulikus kiegészítők mennyiségének és fajtájának hatása a hő fejlődésre szintén bizonyított.

A fő összetevők és a hidraulikus pótlékok különféle kombinációjával különböző mértékű hőfejlesztésű cement készíthető. Természetesen azt is figyelembe kell venni a betonrecept összeállításakor, hogy a nagyobb cementmennyiség nagyobb hőfejlődést eredményez.

A cement típusa inkább a megtermelt hő összmenyiségét befolyásolja, míg a különböző cementek őrlésfinomsága a hőfejlődés sebességét [4].

Az ettringit ($Ca_6 Al_2(SO_4)_3 (OH)_{12} \cdot 26H_2O$) képződést és annak hatását a megszilárdult betonra már 1945 óta vizsgálják [28]. Ez a hőtermelő kémiai folyamat a C_3A és a gipsz reakciója során jön létre, mely elsődleges ettringit képződést idéz elő. A cementben lévő gipsztartalom kimerülése után a C_3A reagál az ettringittel monoszulfátot alkotva. Ez utóbbi jelenség a másodlagos ettringit képződés. A kialakuló ettringit kristályos szerkezetű anyag, melynek durva- és finomkristályos változatait különböztetik meg. Sok esetben megállapították, hogy az ettringit káros, a repedések létrejöttét elősegíti, hiszen a kristályosodás nem kívánt méretű és torz szerkezetű üregeket és pórusokat hoz létre a betonban [29].

A beton tömörségének csökkenése a tartósságát is negatívan befolyásolja. A 9-15 térfogat %-ot meghaladó ettringit képződés repedéseket okozhat a betonban. J. Stark és K. Bollman szerint viszont ez a jelenség nem minden esetben okozza a szerkezet károsodását. Magyarázatuk szerint a betonok utókezelése csökkenti a másodlagos ettringit képződést. Azt is megkérdőjelezték, hogy az ettringit képződés okozza-e az üregek, pórusok, esetleges repedések létrejöttét, vagy a nem kívánatos üregekbe utólag bejutó nedvesség váltja ki a másodlagos ettringit képződést [30].

Fentiek miatt a szulfátálló cement alkalmazása kedvezőbb, mert kicsi a hőfejlődése és így a maximális hőmérséklet is alacsonyabb. Megjegyzendő, hogy C_3A mentes cement is alkalmazható.

A cement őrlési finomsága befolyásolja a hőfejlődés ütemét, minél finomabb őrlésű cementet használunk, annál inkább számíthatunk a hidratáció gyorsabb időbeni lefolyására. A kötést jellemző kémiai reakciók a cement felületén mennek végbe, így mind a szilárdság, mind a hidratációhő függ a cement őrlési finomságától. A finomabb őrlés nagy fajlagos felületet jelent, ezért a hidratáció gyorsabban megy végbe [4].

A maximális cementtartalom figyelembevétele elengedhetetlen a tömegbetonok hőfejlesztése szempontjából. Az ACI (American Concrete Institute) ajánlása szerint a hőmennyiség egyenesen arányos az ekvivalens cementtartalommal (C_{eq}), ami a cement és a puccolános (hidraulikus kiegészítőanyag) anyag összmenyiségét jelenti. Általános

gyakorlat a betontechnológusok által javasolt pernye vagy kohósalak hidraulikus kiegészítő anyaggal készített cement használata, mert ezek hozzáadása csökkenti a beton maximális hőmérsékletét.

A cementtartalom optimális szintjét a cementpép tartalom (a cement és víz térfogatának összege l/m^3 -ben a bedolgozott frissbetonban) befolyásolja, ahol a péptelített beton esetén tudjuk a maximális nyomószilárdságot biztosítani [17].

A víz-cement tényező megfelelő értéke, vagyis a frissbeton készítésekor alkalmazott keverővíz mennyisége egyrészt a hidratációs folyamat elindításához, másrészt a beton bedolgozhatóságát jellemző konzisztencia eléréséhez szükséges. A keverővíz szükséges mennyiségének meghatározása fontos betontechnológiai kérdés, melyet a víz-cement tényező függvényében kell kiszámítani a Bolomey - Palotás képlet segítségével.

$R_{c,m} = A (1/x - B)$, ahol A a cement fajtájától függő állandó, $B = 0,3$, x a víz-cement tényező, $R_{c,m}$ a beton átlagszilárdsága 28 napos korban. Az összefüggésből kiderül, hogy a víz-cement tényező csökkentésekor a beton szilárdsága nő és fordítva.

A folyósító adalékszerek használatával a víz-cement tényező csökkenthető, a kezdőszilárdság növelhető, ezáltal csökkenthető a repedésveszély [1].

A kötőszabályozó adalékszerek hatása többféle lehet. Kötőgyorsító szereket hideg időben, kötőlassító adalékszereket pedig nyári melegben kell alkalmazni. A kezdeti hőfejlődés szabályozása a cél ezen vegyszerek adagolásával. A kötőkéseleltető adalékszerek ugyan a kezdeti hőfejlődést csökkentik, de az összes keletkező hőmennyiséget nem befolyásolják. Továbbá előnye, hogy a beton hosszabb ideig marad bedolgozható (12-16 óra) állapotban és a többretegű betonozás esetén a rétegek összevibrálhatósága biztosítva marad [17].

1.4.3.3 A beton termikus tulajdonságai

Általánosan elmondható, hogy a hővezetési tényezőt az anyag szerkezete, testsűrűsége, tömörsége, nedvességtartalma, hőmérséklete befolyásolja. A betonok esetében az értéke nagymértékben függ az adalékanyag fajtájától, tipikus értékei: 2,3, 1,7 és 1,2 W/mK, kvarc, mészkő és bazalt adalékanyagok betonok esetén [17]. A beton rossz hővezető, amely lassítja a természetes hűlési folyamatot. A cement hidratáció közben a zsugorodás deformációt okozhat a betonban, hiszen nehezen valósul meg a nedvességcsere a környezettel [18].

A hőszállítás a szilárd és a környező levegő között megvalósuló hőterjedési forma. A beton felületéről elpárolgó víz lehűlést eredményez. A lassúbb párolgás hatására a beton nem szárad ki, több víz épül be kötött víz formájában, nagyobb lesz a hidratáció foka. A betonfelszín hőmérsékletesésekor egyre több hő áramlik a felszín felé a beton belsejéből [17].

A betonok fajhője, különböző betonok esetén 0,92 és 1,05 J/g °C. között változik. A fajhő az egységnyi tömeg egy fokkal való felmelegítéséhez szükséges hőmennyiség. Lu szerint a normálbeton fajhőjére az adalékanyag fajtája, keverési arány vagy a beton kora nincs hatással, az adalékanyag termikusan stabil. A tömegbetonok esetében a fajhő értéke változatlanak tekintendő [31].

1.4.3.4 Betontechnológiai tényezők

A zsaluzat minősége: a megfelelően előkészített (tiszt, pontos illeszkedésű, hézagmentes, formaleválasztó anyaggal kezelt) zsaluzatot 2500 kg/m³-es testsűrűségű betonokra kell méretezni. A zsaluzat anyaga a betonfelület hőmérsékletére van befolyással. A beton külső és belső hőmérsékletei közötti különbség csökkenthető a zsaluzat hőszigetelő képességének fokozásával. A 8. ábrán látható különböző minőségű zsaluzatok esetén a vizsgált falvastagságon belül kialakult hőmérséklet eloszlás. A rossz hőszigetelő tulajdonságú, 15 mm vastag rétegelt fa zsaluzat esetén 12-15 °C, míg a rétegelt fa + műanyaghab szigetelés esetén 2-5 °C-ra csökken a legnagyobb hőmérséklet különbség [17].

A zsaluzat minősége tehát a hőmérsékleteloszlásra van hatással. Mivel a kizsaluzásig a betontest nedvességvesztése minimális (a megfelelő utókezelés biztosítása mellett), így a száradási zsugorodás és az abból fakadó térfogatváltozás nem okoz jelentős belső feszültséget. A zsaluzat jelenléte a kéregrepedéseket okozó gátolt alakváltozásért nem felelős.

A kizsaluzás időpontját gondosan kell megválasztani a repedésveszély kialakulásának minimalizálása miatt, az alábbi szempontok szerint:

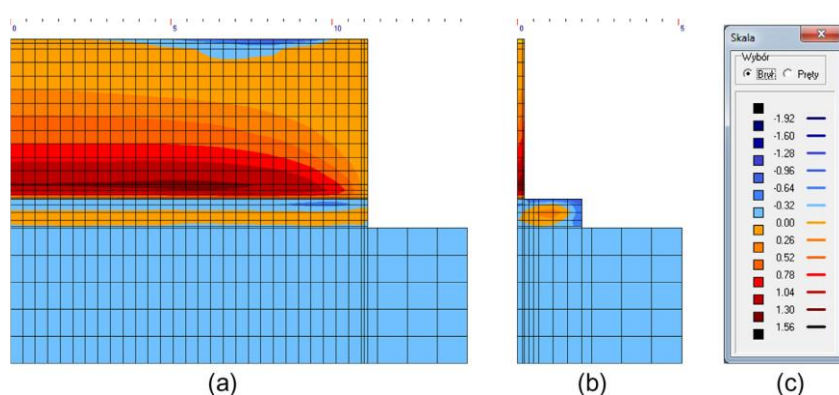
- a beton a saját súlyát már tartsa meg,
- a szerkezet már a visszahűlés stádiumában van,
- a betonban a belső és külső hőmérsékletkülönbség (max. 15 - 25 °C).

A kizsaluzás időpontjában a megengedhető hőmérsékletkülönbség értéke a tömegbeton belseje és felszíne között a szakirodalom szerint 15-25 °C között kell legyen. Klemczak és

munkatársa szerint 15-20 °C-ot nem haladhatja meg a hőmérsékletkülönbség [18], az EUROCODE ezt az értéket 20 °C-ban maximalizálta. Ezzel ellentétben Yunchuan a 35 °C-os hőmérsékletkülönbség elérését sem tartja károsító hatásúnak [21].

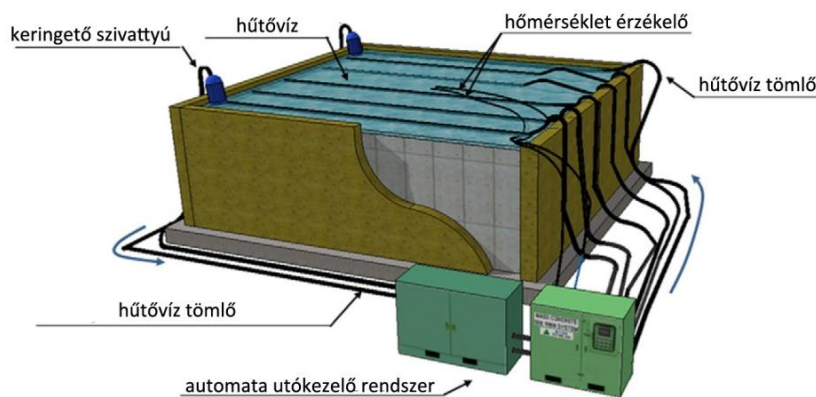
A kiszaluzást követően számolni lehet a külső léghőmérséklet és a beton kötése közben fellépő hőfejlődés miatt kialakuló megnövekedett hőmérséklet különbségre, amely repedéseket okozhat. A zsaluzat eltávolításakor ügyelni kell, hogy az elkészült szerkezetet ne érje káros hatás (pl. ütközés, vibráció) [22].

Klemczak végeselemes vizsgálata a zsaluzat korai, azaz 3 nap utáni eltávolításának hatásait elemezte. A 11. ábrán a feszültségeloszlás látható a falban és az alapozásban 70 órával a fal öntése után [18].



11. ábra: Feszültségeloszlás a falszerkezetben [18]

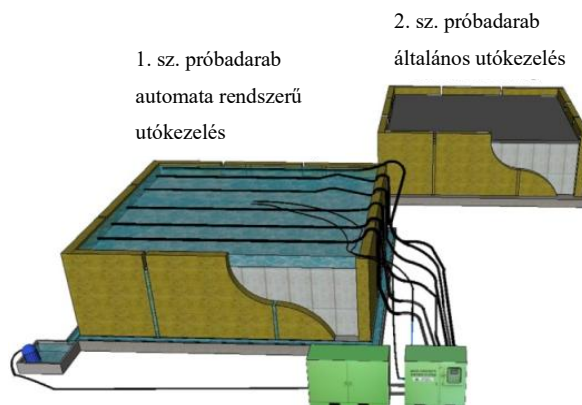
Az utókezelés során a betonnak a kötési folyamat zavartalan lefolyásához és szilárdulásához vízre, nedvességre van szüksége. Az utókezeléssel lehet biztosítani a kötéshez szükséges vízmennyiséget, valamint a beton megfelelő hőmérsékleten tartását. A betonozást követő első 24 órában a legintenzívebb a kipárolgás.



12. ábra: A beton kiszáradási zsugorodásának csökkentése automata utókezelő rendszerrel [33]

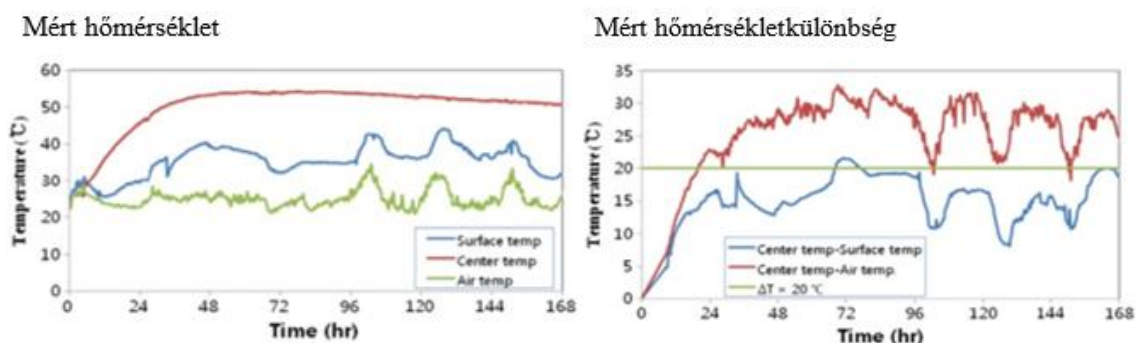
A beton felületén kialakuló repedések (kéregrepedések) megelőzése céljából betonszigeteléssel (zsaluban-tartással, fólia/terfil/fólia takarással, párazáró bevonat felhordásával) lehet védekezni, kerülve ezzel a beton kiszáradási zsugorodását [22].

Az utókezelés fentebb említett módszere mellett még a csővezetékes hűtés (pl.: nitrogén hűtőfolyadékkal), párazáró filmréteg alkalmazása vagy a hagyományos felszíni vízűtés (12.ábra) [33] is alkalmazható.



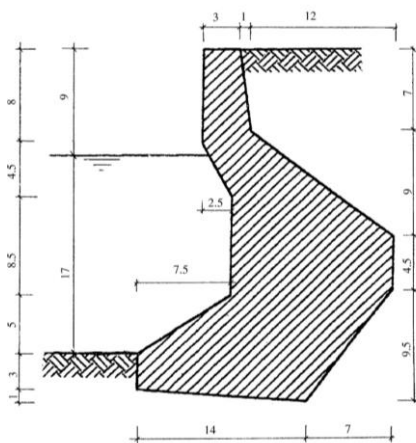
13. ábra: Az 1.sz próbadarab automata utókezelő rendszerrel és 2. számú általános utókezeléssel ellátott próbadarab egyszerűsített modelljei [33]

A mérési eredményekből kiolvasható, hogy az automatizált rendszer (13. ábra) segítségével a beton belseje és felszíne között kialakuló hőmérsékletkülönbség nem haladta meg a 20 °C-ot az 1. sz. próbadarab esetében, míg a 2. sz. próbadarabnál elérte a 29 °C-ot is (14. ábra). A második minta esetében a hőfeszültségek következtében kialakuló repedések a 0,4 mm-t is elérték, amelyek a szerkezet tervezett élettartamra vonatkozó tartósságát veszélyeztetik. A repedések kialakulásának minimalizálása mellett fontos szempont volt a gazdaságos és környezetbarát utókezelés megvalósítása is. További előnye a rendszernek, hogy az automatizálással munkaerőt lehet megtakarítani, fokozható a termelékenység, biztosítható a megkívánt betonminőség, még folyamatos betonozás mellett is [33].



14. ábra: A mért hőmérsékletek és hőmérséklet-különbség [33]

Szerkezet mérete és a szakaszos betonozás: Betontechnológiai okokból az egyes szerkezeteket szakaszosan (vertikális vagy horizontális tagolás) kell betonozni. Ez a módszer a folyamatos betonozással szemben nem csak kivitelezési szempontból előnyösebb, hanem hőmérsékletszabályozó szerepe is van, mert így a maximális hőfeszültség csökkenthető [32]. A gyakorlatban a szakaszos betonozás minimum három nap elteltével folytatható, így elkerülhető a beton kiszáradása, az esetleges repedések kialakulása és elősegíthető a cement hidratációja [22]. Ezen állításokkal ellentétben Schutter és munkatársa szerint nem minden esetben tanácsos a szakaszos betonöntés alkalmazása. Egy antwerpeni kikötő rakpart falát vizsgálta végeelem-módszerrel. A rakpart különleges, J-alakú geometria mellett (magasság: 30 méter, legszélesebb pontján 20 méter vastag) acélbetét megerősítés nélküli tömegbetonból volt tervezve (15. ábra). A FEM modellezés segítségével két esetet vizsgált a szerző. Az egyik esetben hat horizontális szakaszt feltételeztek, amelyben a két szakasz közti várakozási időt három nap, valamint egy-két hét között is meghatározták. A szimuláció során kiderült, hogy a még irreálisan hosszú egy-két hetes várakozási idő mellett is túl magas lenne a hőmérséklete az előzőekben megépített szakasznak, így a hősokk és az abból származó feszültségek a szerkezet károsodásához vezetnének. A másik esetben a modellt egyrétegbeli kiöntéssel szimulálták. Az eredmények szerint, a 200 kg/m^3 -es cementtartalom és az 5°C -os beton bedolgozási hőmérséklet mellett a repedések elkerülhetők [34].

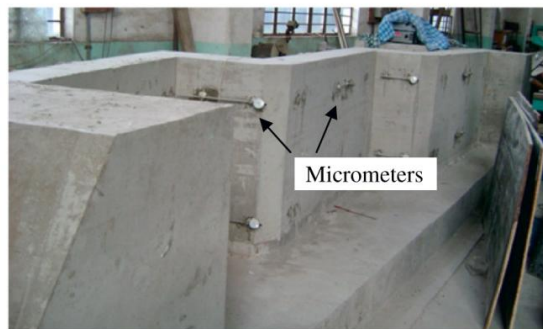


15. ábra: A tervezett rakpart szerkezeti geometriája tömegbetonból [34]

A szimuláció eredménye azt igazolta, hogy a szakaszos betonozás ennél a geometriánál és peremfeltételek mellett repedések kialakulásához vezet. Ez az eredmény ellentmond azon kialakult megállapításnak, hogy a szakaszos betonozással elkerülhetők a betont károsító repedések. Viszont igazolja azt, hogy minden megépítendő (eltérő méretű,

betonösszetételű, más kezdeti feltételeket feltételező) tömegbeton esetében a tervezésre és ellenőrzésre kiemelt gondot kell fordítani.

Nem foglalkoztak a cikk szerzői azonban azzal, hogy rövid idő alatt nagy mennyiségű betont kell előállítani, hűteni, továbbá a zsalutechnikai és egyéb technológiai kérdéseket is meg kell oldani.



16. ábra: Az 1:4 arányú vasbeton kísérleti modell [35]

A szakaszos építés és az illesztések hatását vizsgálták Feng Lin és munkatársai is. A betonok repedés-viselkedése szorosan összefügg a mechanikai tulajdonságokkal, többek közt a rugalmassági modulus, szakítószilárdság, zsugorodás, kúszás értékével, illetve a hidratációs hőfejlődés is természetesen szerepet játszik. Tanulmányukban ezen tulajdonságok időbeni lefolyását igyekeztek megfigyelni egy 1:4 arányú, bonyolult geometriájú vasbeton tömegbeton fal modellen (16. ábra). A megépített modell mellett a FEM elemzésre is sor került.

A 165 napig tartó kísérlet során a korábban említett mechanikai tulajdonságok mindegyikének vizsgálatára sor került. A FEM segítségével 6 különböző beállítást szimulált a kutatócsoport, más és más peremfeltételek beállítása mellett. Igazolást nyert, hogy az ésszerűen megválasztott szakaszos / lépcsőzetes építési sorrenddel a betonok repedésveszélye csökkenthető. Továbbá azt is megállapították, hogy a repedések kialakulásának helye is valószínűsíthetőbbé válik [35].

A vizsgálat során nem vették figyelembe a betonacélok és a beton közötti súrlódást, a tapadást maximális értéken feltételezték.

Jelen fejezetben összefoglaltam a tömegbetonokkal kapcsolatban felmerült legfőbb probléma, a repedésveszély (kéreg- és átmenő repedések) kialakulásának okait. Belátható, hogy a tervezett használati élettartam, a tartósság, illetve a szerkezet teljesítőképessége sok paraméter egyidejű optimalizálása mellett biztosítható. Rámutattam, hogy a repedések kialakulásának kiváltó okai közül leginkább a kötőanyag hidratációs hőjének és az abból fakadó hőmérsékletkülönbségnek kell kiemelt fontosságot tulajdonítani.

1.5 Hőmérsékletmérési módszerek a tömegbetonok felszínén és belsejében

Az előző fejezetben ismertettem a tömegbetonok készítésekor keletkező lehetséges repedések típusait (átmenő- és kéreg repedés), amelynek fő oka a szerkezet belseje és felszíne közti nagy hőmérsékletkülönbség. Áttekintettem a gyakorlati tapasztalatok és a kutatások eredményei alapján a hőmérsékletkülönbség kialakulását befolyásoló fontos tényezőket. A repedések keletkezésének meghatározó jellemzője a hőmérsékleti gradiens, ennek megállapítása hőmérsékletmérési módszerekkel történhet.

Jelen fejezetben a repedésveszélyt okozó hidratációshő mérésére alkalmas módszereket fogom röviden ismertetni, amely már az 1930-as évektől - a Hoover-gát építésétől - folyamatosan foglalkoztatta a kutatókat [36]. A maximális hőmérséklet és a legnagyobb hőmérsékleti gradiens előrejelzése kulcsfontosságú szerepet játszott a tömegbetonok kutatásában, amelynek meghatározására több vizsgálati módszert is kidolgoztak az elmúlt évtizedekben.

1.5.1 Hidratációshő meghatározásának mérési módszerei

1.5.1.1 Oldáshő módszer

A statikus módszer oldáshőmérésen alapul, amely esetben a hő fejlődése közvetlenül nem mérhető. A cement oldáshőjét és a cementkő oldáshőjét hasonlítjuk össze tetszőleges időpontban, amelynek különbsége adja a hidratációs hőmennyiséget [4].

1.5.1.2 Kaloriméteres módszerek

A kaloriméter fajtájától függetlenül a hidratációshő közvetlenül követhető a cement és a víz találkozásának pillanatától kezdve.

A kaloriméterek három részből állnak: a reakciótérből, a külső környezetből, valamint a két térrészt elválasztó tartályból. Ha a reakcióteret és az tartályt rendszernek tekintjük, akkor a kalorimétereket működési elvük szerint három csoportba sorolhatjuk:

- adiabatikus,
- izotermikus,
- hőáramlásos kaloriméterek.

Mindhárom módszer közelítő eredményeket ad a hőfejlődés mértékét illetően, de míg a hőáramlásos módszer nem szimulálja a betonszerkezetben lévő valós állapotokat, addig az

izotermikus módszernél a tartály hatással van a mérési eredményekre. Az adiabatikus (környezettől elzárt) módszer elvét viszont a napjainkban végzett laboratóriumi kísérletekben is lehet használni [4].

A hidratációs hő minden cement típus esetében jellemző adat, így ennek mérése kaloriméterrel valósul meg. Több kutatás is irányult arra, hogy milyen berendezéssel oldható meg a vizsgálat, amelyet egyébként szabvány is rögzít. Az egyik legelterjedtebb megoldás az úgynevezett coffee cup kaloriméter használata [29] [37]. Radel és Navidi [38] művében kiemeli, hogy az egyedi fejlesztésű „coffee cup” típusú kaloriméter szigetelése megfelelő labormérések elvégzéséhez. Hill és Petrucci [39] is ezt az állítást fogalmazza meg és leírja, hogy a styrofoam hőszigetelés nagyon kicsi hőveszteséget okoz. Brandy and Senese [40] tanulmányában felhívja a figyelmet arra, hogy a coffee cup kalorimétereknek kicsi a hővesztesége és rövid idő alatt végbemenő reakciók vizsgálatára ajánlja.

A repedés keletkezés elkerülése céljából a cement hőtermelését kaloriméterekkel vizsgálják. A szakirodalmat tekintve vagy szabványos méréseket végeznek [41] szerint, vagy pedig egyedi fejlesztésű kalorimétereket [42] [43] [44] alkalmaznak.

Gibbon és mtsai [45] a beton hőtermelő folyamatát laboratóriumi mérésorozattal vizsgálták, amelyhez egyedi fejlesztésű kalorimétert használtak. Az így kapott eredményeket végelelemes modell bemeneteként alkalmazták.

J. Young [46] cikkében bemutatja a coffee cup kaloriméter sok esetben elhanyagolt hőmérséklet kompenzációs modell jelentőségét és a szigetelés hőtani tulajdonságainak befolyásoló hatását féladiabatikus mérés megvalósítása esetén.

Hazánkban a cement hidratációs hőjének vizsgálatát és berendezés igényét az MSZ EN 196-9:2010 szabvány [41] írja le. A szabvány féladiabatikus módszert és a hozzá tartozó berendezés jellemzőit mutatja be.

1.5.2 Hőmérséklet mérésére alkalmas eszközök

Szakirodalmi kutatásaim során tapasztaltam, hogy a betonok hőmérsékletének mérésére több fajta érzékelőt is használtak a kutatók. A továbbiakban a beton hőmérsékletének mérésére alkalmas érzékelőket kívánom csak bemutatni.

Ipari körülmények között a hőmérséklet mechanikusan és elektromos módon mérhető. Mindkét esetben az anyag hő hatására történő tulajdonságainak változásán alapul a mérés. A mechanikus érzékelő az anyag térfogatváltozását alakítja át mérhető elmozdulássá. Az elektromos érzékelő a változó hő hatására bekövetkező ellenállás változást, ill. a vezetőkön fellépő elektromos feszültséget alakítja át hőmérsékletté.

Az építőiparban leggyakrabban használt hőmérők:

- folyadékhőmérők,
- ellenállás-hőmérők,
- termisztoros hőmérők,
- termoelemes hőmérők.

A betonok hőmérsékletméréséhez olyan hőmérőt kell választani, amely az anyagban marad a kötést/szilárdulást követően is. Ezt az igénybevételt nem minden hőmérő képes viselni a fentebb felsoroltak közül. Továbbá figyelembe kell venni a pontosságát, mérési tartományát, adatnyerési lehetőségeket is.

A kutatásaimhoz legkevésbé alkalmas a folyadékhőmérő, mely sem anyagát (üveg), sem jeltovábbítási képességét tekintve nem felel meg a céloknak.

Az ellenállás hőmérők a fémek ohmikus ellenállás-változásán alapuló hőmérsékletváltozást mérik. Az anyagokat a hőmérséklet-tényezővel jellemezhetjük, amely megadja az anyag fajlagos ellenállás növekedését 1 °C-os hőmérséklet növekedés hatására. Ezen tényező segítségével következtethetünk az ellenállás és a hőmérséklet közötti összefüggésre. A huzalozása leggyakrabban tiszta platina, tiszta nikkel és réz felhasználásával készül. A nikkel gyorsan, a réz igen gyorsan korrodálódik, mely korlátozza a felhasználásukat. Ennek ellenére hosszantartó hőmérsékletmérésre is alkalmasak [4].

Ez a típusú érzékelő segédenergiát igényel, mely mérési hibát eredményezhet (tápellátás hibája, ill. az áram az érzékelőt is felmelegítheti). A leggyakrabban alkalmazott ellenálláshőmérő platina alapú, melyet szabványok definiálnak (PT100 esetében az ellenállás 0 °C-n 100 ohm, két pontossági osztályban: A, B) [47].

C.-Y. Chang mint kontroll érzékelőt használta a PT100 -at. Kutatásai egy új RFIC (Radio Frequency Integrated Circuit) érzékelő kidolgozására koncentráltak, mellyel a betonban mért hőmérséklet és nedvességtartalom mérésére keresték a lehetőséget. A PT100 gyakran használt ipari hőmérsékletek mérésére, széles mérési tartománya (-250 °C / + 640 °C) és 0,1 °C-os mérési pontossága miatt. Nehézséget okozott az érzékelő jelfeldolgozásakor a vezeték ellenállásának figyelembevétele, melyet ma már a 3 eres PFA bevonatú vezetékvezetéssel lehet optimalizálni. További hibaként értékelték a cikk szerzői, hogy a kísérleti betonkockába való elhelyezéskor nem vették figyelembe a PT100-as szenzor minimális bemerülési mélységét, amely a tokozott érzékelőrész min. 50 %-a kell legyen. Ennek a ténynek a figyelmen kívül hagyása azt eredményezte, hogy a fém érzékelő nem

valós eredményeket szolgáltatott a beton hőmérsékletének változásáról. Ennek következtében az érzékelőben gyorsabban csökkent a hőmérséklet, mint a betonban [48].

A termisztoros hőmérők mérési elve: fém-oxidokból sajtolással és zsugorítással előállított félvezetők villamos ellenállása csökken a hőmérséklet növekedésével. Fajlagos ellenállásuk a hőmérséklettel nem változik lineárisan és nagyságrendekkel nagyobb az ellenállás-hőmérőkénél. Előnyeik a kis tömeg, változatos forma, gyors hőmérsékletváltozást is nyomon tudnak követni [4].

A termoelemes hőmérők működési elve: két különböző fémből vagy fém ötvözetből álló dróthuzal forrasztása helyén a hőmérséklet hatására termoelektromos feszültség keletkezik, mely arányos a forrasztási pont és a hőelem másik (összehasonlító) pontja között kialakuló hőmérséklet különbséggel. A termoelem annál érzékenyebb minél nagyobb a kialakult termofeszültség a melegpont (mérőpont) és a hidegpont (összehasonlító) között [4].

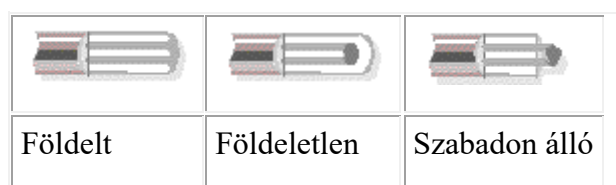
A két fém anyagtól és a mérési tartománytól függően több típusa létezik, melyet az alábbi táblázatban ismertetek (5. táblázat).

Betűjel	Összetétel	Hőmérséklet tartomány
B	Platina-30% -Platina-6% Ródium	0°C ... 590°C
		600°C ... 1190°C
		1200°C ... 1810°C
E	Chromega® - Konstantán	-260°C ... 340°C
		350°C ... 990°C
J	Vas - Konstantán	-200°C ... 490°C
		500°C ... 1190°C
K	Chromega® - Alomega®	-260°C ... 290°C
		300°C ... 840°C
		850°C ... 1370°C
N	Nikkel króm ezüst ötvözet - Nikkel ezüst ötvözet	-260°C ... 490°C
		500°C ... 1290°C
R	Platina-13% Ródium - Platina	-40°C ... 540°C
		550°C ... 1140°C
		1150°C ... 1760°C
S	Platina-10% Ródium - Platina	-40°C ... 540°C
		550°C ... 1140°C
		1150°C ... 1760°C
T	Réz - Konstantán	-260°C ... 390°C

5. táblázat: A termoelemes hőmérők típusai [49]

Fentiek közül a négy leggyakrabban használt típus a J, K, T és E jelű, melyekből való választás a felhasználástól függ. A védőburokkal ellátott hőelemek három különböző kialakítással készülnek: földelt, földeletlen, szabadon álló (17. ábra).

A földelt kialakítású érzékelő esetében a hőelem vezetékei csatlakozási pontja a védőburkolat csúcsához van erősítve, így biztosított a jó hőáram a falon át a környezet és az érzékelő között. *„A földeletlen kialakítású érzékelőnél a hőelem csatlakozó pontja és a fal nem érintkezik. A mérés reakcióideje hosszabb, mint a földelt esetében, de biztosítottá válik bizonyos fokú elektromos szigetelés. A szabadon álló kialakítású hőelem vezetékeinek csatlakozó pontja, a mérőpont, ki van vezetve a védőburkolat csúcsánál. Ennél a konstrukciónál érhető el a legjobb válaszdő (reakcióidő), de az alkalmazhatósága igen behatárolt: csak nem korrozív, nem túlnyomásos közegben alkalmazható”* [49].



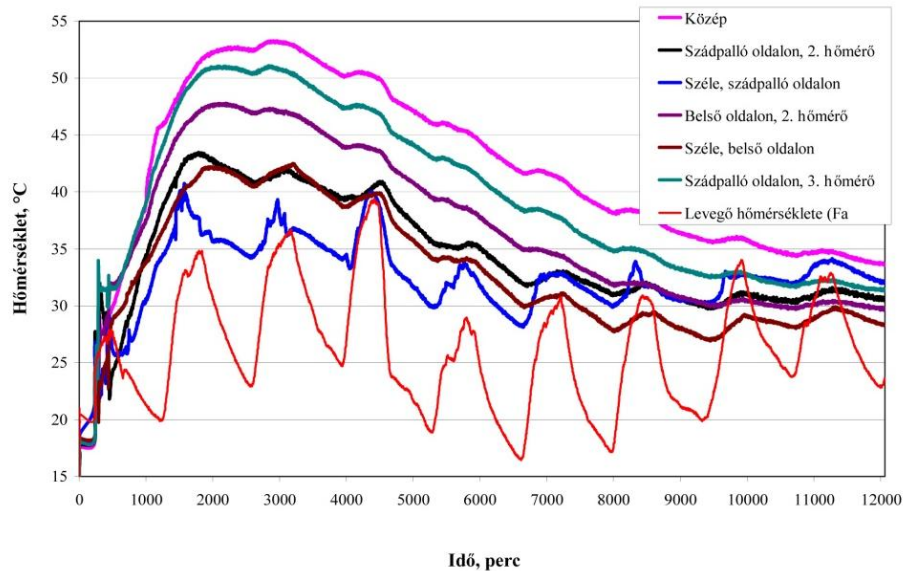
17. ábra: A hőelemek kialakítási lehetőségei [49]

A termoelemes hőmérőket gyakran alkalmazzák a betonszerkezetek belső hőjének mérésére. A betonok esetében a minta térfogatától függően 3-9 nap is lehet a mérés időtartama, amelyre a termoelemes hőmérők kiválóan alkalmazhatóak.

2007-ben kérték fel a Budapesti Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karának Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszékének munkatársait, hogy a 4-es Metró Tétényi úti állomásán épülő gerendabeton hőmérsékletét mérjék meg a szerkezeti repedések elkerülése végett. A Tanszék munkatársai (Dr. Nehme Salem Georges) egy J- típusú (Fe-Ko), tokozott termoelemes hőmérőt használtak a feladatra, amelynek jelét egy már korábbi fejlesztésű berendezéssel regisztrálták. A hőmérsékletmérés valós idejű volt és azonnali beavatkozási lehetőséget biztosított az esetleges átmenő repedések kialakulásának elkerülése érdekében. A munkatársak a korszerű és gondosan kifejlesztett rendszernek köszönhetően megállapíthatták, hogy a maximálisan kialakult 18,2 °C-os hőmérsékletkülönbség miatt nem volt szükség különleges beavatkozásra. A mérés időtartama, mint a 18. ábrán is látható, 12000 perc (8,3 nap) volt [17].

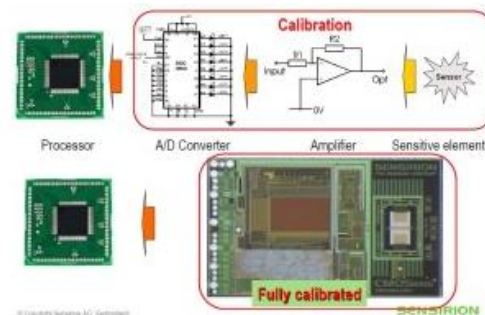
A termoelemek (aktív érzékelők) használatának előnye, egyrészt az érzékelő közel lineáris karakterisztikája, továbbá, hogy nincs szükség segéd-tápellátásra a működéséhez. A berendezés kalibrálása a mérés előtt könnyen és hitelesen megoldható. A tömegbetonokban

lezajló hidratáció a keverővíz hozzáadásától számított maximálisan 7-9 nap alatt megvégeződik. Amennyiben ezen hidratáció hőmérése a cél, a termoelem alkalmasnak bizonyul. Megnehezíti viszont a munkát a hidegpont kialakítása (összehasonlító pont) és a mérés időtartama alatt a folyamatos fenntartása/védelme.



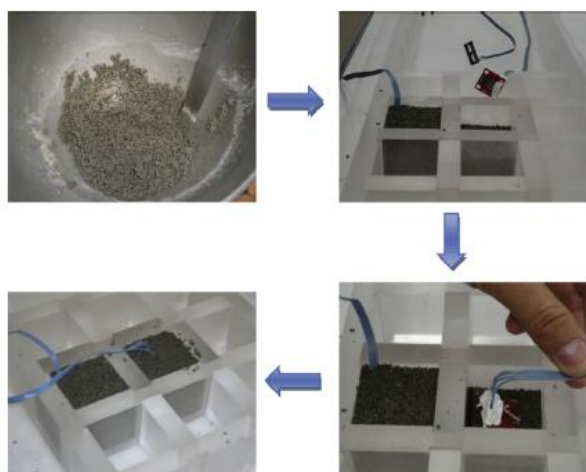
18. ábra: Mérési eredmények a termoelemes hőmérő használatával [17]

A multiszenzorokkal végzett kísérletekre a szakirodalomban számos példát találtam. Leggyakrabban a hőmérséklet és páratartalom mérésére egyszerre alkalmas SHT érzékelőket (19. ábra) használták, melyek CMOS (Complementary metal–oxide–semiconductor) típusú érzékelők. A CMOS érzékelők egy chipen tartalmazzák a mérőlánc minden elemét: hőmérséklet és páratartalom érzékelő, pontos referencia feszültség, alacsony szintű lineáris erősítő, AD átalakító ill. interfész áramkör. A betonba való beépítést a DFN tokozás teszi lehetővé. A svájci Sensirion cég által kínált SHT érzékelő kompakt (3x3x1,1 mm-es), megbízható és hosszú távú mérést biztosít. Mérési tartománya 0-100 % relatív páratartalom és -40 °C/+125 °C hőmérséklet [50].



19. ábra: Az SHT érzékelő felépítése [34]

Egy portugál kutatócsoport a vezeték nélküli távfelügyelet kidolgozásakor használta kísérleteiben az SHT21S típusú szenzort. A beton hőmérsékletének és páratartalmának mérésével több szempontból is fontos eredményt értek el. Az SHT21S szenzort védelem nélkül és különböző fizikai és kémiai hatások ellen is hatásosnak vélt védelemmel látták el. Az érzékelő önálló beépítése (20. ábra) során az eredményeket 16 ill. 21 órán át szolgáltatatta, majd az agresszív lúgos környezetben a jeladás leállt.



20. ábra: Az SHT21S érzékelők beépítése [51]

A kutatócsoport javaslata polimer vagy fém anyagú bevonat készítése, mellyel a kémiai hatásoknak jobban ellenálló szenzor alakítható ki. A másik kísérleti modelljükben az SHT21S-t először durvahomokból készített habarcskockába ágyazták. Az így előkészített érzékelő került bele a betonba, ahol a durvahomokból készített kubus nem akadályozta a páratartalom mérését sem. A méréseket 1-4 napon keresztül folytatták sikeresen, majd az érzékelő tönkrement. Ebben az esetben is a kémiai korrózióknak köszönhetően történt meg az érzékelő rongálódása. Megoldásként, mely további kutatásokat igényel a textil vagy műanyag bevonat alkalmazását javasolták a mérnökök [51].

A MEMS (Microelectromechanical Systems) szenzorok a nanotechnológiai fejlesztéseknek köszönhetően egyre elterjedtebbek. Kutatásaim során a kísérleteimhez leginkább alkalmas szenzor keresése közben ennek az érzékelő típusnak is megvizsgáltam a felhasználási lehetőségét. A MEMS -ek az integrált áramkörök segítségével lehetővé teszik több paraméter egyidejű mérését, mint például nyomás, hőmérséklet, nedvességtartalom, kémiai tulajdonságok, feszültség / deformáció, gyorsulás, stb. Norris kutatásai során mind analitikus, mind kísérleti úton igazolta a MEMS betonba ágyazásának relevanciáját. A hőmérséklet és páratartalom mérésére egyaránt alkalmas érzékelő túlélte

a beton korróziós környezetét és a kimeneti jel jól tükrözte a beton tulajdonságainak változását is [52].

A MEMS tehát jól alkalmazható fent említett paraméterek mérésére a betonban, hiszen nagy hatékonyságú és pontos. Az érzékelővel kapcsolatosan megválaszolatlanul maradt a kérdés, mely szerint a beton érzékelőre gyakorolt hosszú távú kérdéseit nem vizsgálta.

1.7 Hőmérsékletszámítási módszerek a VEM / DEM segítségével

A mérnöki gyakorlatban sokszor szükséges a diszkrét felépítésű szerkezetek (falazott boltívek, hidak), vagy anyagok (szemcsehalmozok, töredezett sziklatalaj egy völgyzárógát közelében) mechanikai viselkedését előre jelezni. Az ilyen szerkezetek viselkedését alapvetően a felépítésük diszkrét jellege határozza meg. Az 1970-es évek óta e mechanikai viselkedés numerikus vizsgálatára több diszkrét elemes modellt alkottak meg.

"Minden diszkrét elemes modell különálló elemekből és az az elemek érintkezésével létrejövő kapcsolatokból áll." [53]. A modellben az elem sokszor megfeleltethető az anyagot vagy szerkezetet alkotó egységnek. Cundell és Hart szerint egy numerikus eljárást akkor tekinthetünk diszkrét elemes modellnek, ha egymástól egyértelműen elkülöníthető elemekből épül fel; az elemek önálló elmozdulási szabadságfokkal rendelkeznek, oly módon, hogy a modell képes követni az elemek véges nagyságú eltolódásait és elfordulásait; az elemek között új kapcsolatok jöhetnek létre és meglévő kapcsolatok szűnhetnek meg. Az eljárás három fő részből áll: a kiindulási geometria megadása; az anyagi jellemző paraméterek megadása; a terhelési folyamatok szimulálása [53].

A beton inhomogén, anizotróp, többféle méretű szemcsehalmozokból álló anyag. A cementhidratáció folyamán létrejövő kémiai kötés új kapcsolatokat hoz létre (cementpép) és alakítja ki a frissbeton tulajdonságait (konzisztencia). A DEM (Discrete thermal Element Modelling) eljárás lehetővé teszi a betonok belsejében lejátszódó termodinamikai és mechanikai folyamatok egyidejű modellezését.

Szakirodalmi kutatásom során leginkább a FEM (Final Element Modelling) eljárás alkalmazását találtam leggyakoribb megoldásnak a betonok fizikai, mechanikai tulajdonságainak meghatározása eszközéül. A módszer segítségével több kísérleti beállítás is megvizsgálható ugyanazon szerkezet tekintetében, így könnyen előre jelezhető az esetleges tervezési hiba. A modellezésre többek közt alkalmas szoftverek: Adina, Ansys, Lusas, vagy a MIDAS [21] jelentősége tehát kiemelkedő a projektek időtervének és költségeinek optimalizálása tekintetében. A FEM modell esetében a kiválasztott

vizsgálandó paraméterek és a kezdeti peremfeltételek megadása mellett a betont több esetben is lineárisan izotróp anyagként kezelik [35]. Ezzel ellentétben Klemczak szerint a tömegbetonok esetében a különböző tulajdonságokkal rendelkező mezők kialakítása szükséges a modellezés pontossága érdekében [19]. Ez a megállapítás viszont az anyag, azaz a beton anizotrop viselkedését feltételezi. Kiegészítésként meg kívánom jegyezni, hogy a modell izotróp vagy anizotrop voltának megítélését véleményem szerint a betontest dimenziói (méretei, térfogata), elhelyezési módja (alap vagy felmenő fal) is befolyásolja. Szakirodalmi kutatásom során feltártam, hogy a kutatók a VEM módszert részesítették előnyben. Felveti a kérdést, hogy a VEM módszernél szükségszerűen elhanyagolt paraméterek (pl.: falsúrlódás, acélbetétek tapadása,...) befolyással van a numerikus modellre. E paraméterek elhanyagolása a modell helyességének ellenőrzésekor hibaforrásként jelentkezhetnek, téves következtetések vonhatók le a kísérleti eredményekből. A VEM módszer alkalmazhatósága, az eredmények validálása viszont számos esetben bizonyítást nyert. Ezt figyelembe véve kutatásomhoz a VEM módszert választottam és dolgoztam ki segítségével az eredményeimet.

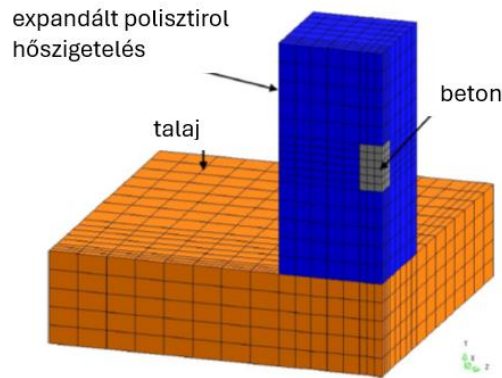
1.8 A végeselemes módszer alkalmazása a tömegbeton szerkezetek esetén

1.8.1 A tömegbetonok repedési hajlamának vizsgálata

A tömegbeton szerkezetek esetén számolni kell azzal, hogy a cement nagy mennyiségű hőfejlését okozta hőmérsékletkülönbség okozta húzófeszültség, ha meghaladja a betonszerkezet saját húzófeszültségét kialakulhatnak kéreg- ill. átmenő repedések. Az így keletkező repedések a beton szövetszerkezetében tartósan kárt okoznak, így a beton teljesítőképessége csökken.

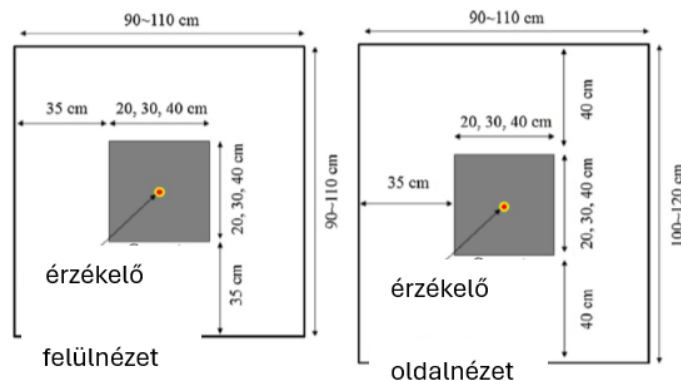
A húzófeszültségek okozta térfogatváltozása a szerkezetnek a beton kötési szakaszát követő korai szilárdulási szakaszában következhet be, így a készítés kori első 48-72 órában bekövetkező hőmérsékletváltozást érdemes figyelemmel kísérni.

Több szerző cikkében említi, hogy a betonszerkezet hőmérséklet felügyelete érzékelőkkel költséges, a beton tartós károsodása elkerülhetetlen. Ennek okán Chang – Keun és munkatársai [54] is a végeselem modellezést ajánlják a repedési hajlam detektálásához.



21. ábra: A féladiabatikus modell [54]

A szerzők cikkükben adiabatikus és féladiabatikus modell (21. ábra) segítségével készítenek elemzést, majd az általuk kifejlesztett új módszert valós modellen validálták. A végelelemes modellezés során különböző méretű beton próbatestet definiáltak (22. ábra) és ezeket jelentősen nagyobb hőszigetelő réteggel látták el.



22. ábra: A különböző méretű próbatestek és a hőszigetelő réteg méretei [54]

Eredményeiket tekintve egyrészt a szabványos mérésekkel szemben a kutatócsoport egy gazdaságosabb megoldást talált, másrészt a szimuláció és a megépített modell eredményeit tekintve a mérési hibahatár az 5 %-on belül esett. Mindezek mellett a maximális hőmérséklet különbség a mérés és a VEM analízis között 0,1 °C volt. Szerzők cikkükben bemutatott eredményei meggyőzőek ugyan, de ahogy ők sem, úgy más szerzők sem indokolták, hogy a választott beton próbatest mérete miért akkora volt.

Szakirodalmi kutatásom során legtöbb esetben a próbatest mérete csak bemeneti paraméterként jelent meg, de annak méretére való magyarázatot nem találtam. Ennek okán az egyik kutatási célomnak azt tűztem ki, hogy a tömegbetonokra jellemző, minimális próbatest méretét kívánom meghatározni. Szakirodalmi kutatásom során nem találtam

egyértelmű választ arra a kérdésre, hogy mekkora az a minimális modellezhető beton próbatest méret, amely tömegbetonok esetén realisztikus eredményt szolgáltat a végelelemes analízis során. Ennek okán a kérdés megválaszolása köré építem vizsgálataimat.

1.8.2 Betonacél alkalmazása során felmerülő kérdések

B. Klemczak [19] cikkében vasbeton tartály és vasbeton híd-elem repedéseinek okait vizsgálja. Kiemeli a megfelelő anyagválasztást, hiszen sokszor a nagyobb szilárdságot biztosító CEM I típusú kötőanyagot írja elő a szabályozás, figyelmen kívül hagyva a magas kötési hőfejlődést. Az előírások szerinti betonkeverék használata nagyobb repedéskockázatot jelent. Numerikus modellel igazolják állításaikat és tűzik ki további feladataikat.

X. Song. és mtsai. [55] arra hívják fel a figyelmet, hogy a vasbeton szerkezeteken kialakuló repedéseken keresztül a betonacélt érő hatások az acél korrózióját elősegíthetik. Vizsgálataik a beton és a betonacél közötti kötési kapcsolatot célozzák; az idő függvényében állapítják meg a kötési összetartó erőket, nyomószilárdságot a fiatal betonban.

Kutatásom elkerülhetetlenül kiterjedt arra a kérdésre, hogy a betonacél jelenléte - vasalás - mennyire befolyásolja a szerkezetben kialakuló hőmérsékletkülönbséget. További kérdés volt, annak megválaszolása, hogy a betonacél mennyisége hogyan befolyásolja a betonszerkezetben kialakuló hőmérsékleti mezőket [56].

1.8.3 A talaj és a levegő hatása a beton próbatestre

Egyetemes álláspont, hogy érdemes a szimulációk alkalmával minél egyszerűbb modellt készíteni. Ennek mentén a szakirodalom számos példát mutat, hogy a megvalósítandó projekt először szimuláció segítségével kerül vizsgálatra. Az elemzés során nem elég a geometria és a betonösszetétel pontos meghatározása, de a betonozás körülményeit is figyelembe kell venni. Ezt többféle képpen is megtehetjük.

M. Azenha [57] és mtsai numerikus modelljük helyességét laboratóriumi kísérletekkel igazolták, melyben a fiatal beton hőfeszültség okozta alakváltozását vizsgálták. Ezen eredményeket figyelembe véve B. Kuriakose [58] és mtsai. dolgozták ki szimulációs modelljüket és elemezték a szakaszos öntés hatását a szerkezet repedésmentességét biztosítandó.

T. Honorio [27] és mtsai cikkükben ismert geometriájú modellen már az előző cikkekhez viszonyítva több paramétert is vizsgáltak. A környezeti hőmérséklet, a napsugárzás és visszasugárzás, valamint a különböző hővezetési tényezőjű zsaluzatok figyelembevétele mellett a fiatal beton mechanikai és hőtani viselkedésének hatását is felhasználták számításaikban.

A fentiek alapján látható, hogy a végeelem modell segítségével az ismert geometriájú szimulált modelleken előre tervezhető a repedési hajlam csökkentése, így biztosítható a betonszerkezet tartóssága. Ennek okán a kutatásomat kiterjesztettem a levegő és talaj hőelvonó képességének vizsgálatára, amelyek a tömegbeton szerkezet lehűlésekor befolyásolják annak hőmérsékletét.

1.8.4 Változó környezeti hőmérséklet hatása a tömegbeton szerkezet hőmérsékleti mezőjére

Qingbin Li [59] és mtsai eltérő időjárási viszonyok hatását vizsgálta, akként, hogy különböző környezeti hőmérsékleten készült beton próbatesteket hasonlítottak össze. Megállapították, hogy téli és nyári betonozás hatással van a beton szilárdsági tulajdonságaira, továbbá, hogy a nyári betonozás a beton szilárdságát illetően kedvezőbb időszak.

Hordijk és Reinhardt [60] hasonlóan Qingbin Li és mtsaihoz kísérleteket végzett a kötés kori feltételek változtatásával és vizsgálták a betonok szilárdsági tulajdonságait. A kapott eredmények azt mutatják, hogy a mechanikai jellemzőket az alkalmazott kötési és szilárdulási körülmények befolyásolják.

Zhou Yunchuan [21] és mtsai a beton szilárdulási folyamatát vizsgálták végeelemes módszerrel, ahol állandó környezeti hőmérsékletet feltételeztek. Kutatásuk eredményeként megállapították, hogy a repedésveszélyt nagy mértékben befolyásolja a külső felület és a beton magja közötti hőmérséklet különbség alakulása. A szerzők a kötési idő alatti hőmérsékletek figyelemmel kísérését és befolyásolását tekintik alapvető fontosságúnak a repedésmentes szerkezet biztosítása szempontjából.

Kim et al. [61] tanulmányukban a beton törésjellemzőit vizsgálták a korai szilárdulási szakaszban. Az eredményül kapott paramétereket végeelemes analízishez használták bemenetként és jellemezték a beton 1-28 napig tartó szilárdulási szakaszát.

A szakirodalomban több cikk is foglalkozik a környezeti hőmérséklet befolyásoló hatásával, amely a kötés kor kialakuló betonszerkezet hőmérsékletét elemzi. A kutatások

viszont hiányosak arra vonatkozóan, hogy az egy napon belül változó - azaz napi hőmérséklet ingadozás – hogyan hat a kötési folyamatra. Ennek okán terjesztettem ki a kutatásom a változó környezeti hőmérséklet befolyásoló hatását vizsgálандó.

1.9 A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

A fentiek alapján megállapítható, hogy a tömegbetonok, mint különleges technológiával készített betonok számos megoldandó problémát vetnek fel a megfelelő szilárdság, illetve a megkövetelt használati élettartamot biztosító tartósság szempontjából. A betonminőséget a megfelelő betonösszetétel megválasztásával, továbbá a kivitelezéskor szigorúan betartott technológiai szabályokkal lehet biztosítani. Szakirodalmi kutatásom során a legfőbb problémát a beton zsugorodásából eredeztethető átmenő- és kéregrepedések kialakulásában találtam.

A repedésveszély csökkentése a mai napig az egyik legfontosabb mérnöki feladat.

A másik fontos kérdés, a már innovatív megközelítés, azaz a készülő beton folyamatos ellenőrzése, illetve a tönkremenetelének előrejelzése. A probléma forrását több kutató is a betonok termikus zsugorodásában találták meg, hiszen a kötőanyag hidratálása exoterm kémiai folyamat. A cement minőségétől és mennyiségétől függő hőtermelés esetében, többek közt a hőfejlődés sebességét, a tömegbeton belseje és a felszíne között kialakuló hőmérsékletkülönbséget, a beton fajhőjét, hővezető képességét kell leginkább figyelembe venni. A tömegbeton készítésére több irányelv is megfogalmazza a szabályokat, figyelembe véve az eddigi tapasztalatokat, mind az összetételt, mind a technológiai kérdéseket illetően.

A szakirodalmi kutatásomat kiegészítve betontechnológusi, kutató-mérnöki véleményeket interjú keretében is meghallgattam, hiszen a gyakorlati tapasztalatok ezen a területen elengedhetetlenek. Megállapítottam, hogy a publikált kutatási eredmények, a megfogalmazott irányelvek és a gyakorlati, kivitelezési technikák több ponton is eltérnek. Ellentmondásos kérdésként és további kutatási témaként fogalmaztam meg a tömegbeton szerkezetek kizsaluzási idejét, a megfelelő utókezelési technológiát, valamint a maximális, még a repedésveszély elkerülését biztosító hőmérsékletkülönbség meghatározását.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben mutatom be a kutatásom során alkalmazott módszereket, a vizsgálatok során használt anyagok paramétereit, berendezéseket és a megvalósított méréseket.

A szakirodalmi áttekintést követően arra megállapításra jutottam, hogy a hidratáció során kialakuló hőmérsékletet befolyásoló legfontosabb tényezők az alábbiak. Állításom igazolása érdekében az alábbi függvényt definiálom:

$$T=f(\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \theta, \kappa, \sigma), \text{ ahol}$$

T : hőmérséklet

α : külső környezeti hőmérséklet

β : a frissbeton bedolgozási hőmérséklete

γ : cement minősége

δ : cement mennyisége

ε : víz - cement tényező értéke

ζ : zsaluzat minősége

η : kizsaluzás időpontja

θ : szerkezet geometriája

κ : utókezelés módszere

σ : kötés kezdetétől eltelt idő

Amennyiben a hőmérséklet (T) a vizsgálati paraméter, úgy a fenti faktorokat tartom fontosnak figyelembe venni és a hatásukat bizonyítani. Ennek érdekében egy egyedi fejlesztésű kalorimétert terveztem és állítottam össze, amelyben a cementhabarcs minták hőmérséklete mérhető az idő függvényében.

2.1 Egyedi kaloriméter fejlesztése

A hidratációs hő mérése az MSZ EN 196-9:2010 *Cementvizsgálati módszerek 9. rész: Hidratációs hő. Féladiabatikus módszer* szabvány szerint történik. Célom egy olyan egyedi fejlesztésű kaloriméter összeállítása volt, amellyel gazdaságos és egyidejűleg több minta mérésére is alkalmas készülék álljon rendelkezésemre, így az adatgyűjtési idő minimalizálható a közel 1 hétig tartó mérések során.

A kutatásaim során többnyire a CEM I típusú cementtel végeztem kísérleteimet. A használt cement hidratációhőjét ábrázoló függvényt (lásd később 29. ábra) a Duna-Dráva Cement Kft. váci gyárában készült szabványos mérések alapján vettem fel és használtam szimulációk során. A hidratációhő cement függő, a további vizsgálatok elvégzéséhez újabb hőfejlődési görbékre volt szükségem. Az alábbiakban a kifejlesztett féladatikus kalorimétert és annak hőtani jellemzőinek meghatározását mutatom be.

2.1.1 A berendezés tervezése és összeállítása [62]

A cement hidratációs hőjét mérő egyedi fejlesztésű kaloriméter több részből áll: egy hőszigetelő és párazáró dugóval ellátott hőszigetelt tartályból, valamint a hozzá tartozó hőmérsékletet mérő és mérési adatgyűjtő egységekből.

2.1.1.1 A hőszigetelt tartály kialakítása

A hőszigetelt tartály a minta tárolására alkalmas belső habarcstartályból, illetve az azt körülvevő hőszigetelő rétegből áll. A habarcstartály esetén fontos szempont a többszöri felhasználás lehetősége, hiszen a mérés végére a friss habarcs minta megszilárdul.

A habarcstartály másik fő követelménye a vízzárás biztosítása. A vízveszteség a kötési folyamatokat nagymértékben befolyásolja. A fentebb említett két alapkövetelmény szerint célszerű forgásszimmetrikus tartályokat használni, melyek közül a hengeres kivitelre esett a választás.

A méréshez szükséges keverék szabványhomokot, cementet és ionmentesített vizet tartalmaz, amely mennyiségek az 6. táblázatban találhatók.

Anyag	Tömeg [g]
cement	360±0,5
szabványhomok	1080±1
ionmentesített víz	180±0,5
összesen	1620

6. táblázat: A habarcs keverék EN 196-1 szabvány szerint

A vizsgálathoz szükséges habarcs mennyisége 1575 gramm. A habarcs készítésekor a keverőedényhez és a keverőszárhoz tapadó keverék mennyiségével számolni kell a keverék összeállításakor, ezért a szükséges összetevőkből többet mértem ki. A szabványhomok mennyisége 1500 g, amelyben a frakciók aránya adott, így a habarcstartály térfogatát a

fenti mennyiséghez kellett illeszteni. A méréshez szükséges 1575 ± 1 g tömegű keverékre van szükség, ehhez igazodva az alapanyagok mennyisége a 7. táblázatban látható.

Anyag	Szabványban előírt mennyiség [g]	Szabványhomokhoz viszonyított mennyiség [g]	Mennyiség a keverékben [g]
cement	$360 \pm 0,5$	500	350
szabványhomok	1080 ± 1	1500	1050
ionmentesített víz	$180 \pm 0,5$	250	175
összesen	1620	2250	1575

7. táblázat: Alapanyagok arányos átszámítása

A kapott tömegből és az anyagok sűrűségéből számított térfogatokat a 8. sz. táblázatban tüntettem fel.

Anyag	Szabványban előírt mennyiség [g]	Sűrűség [g/cm ³]	Térfogat [cm ³]
cement	350	1,50	230
szabványhomok	1050	1,55	670
ionmentesített víz	175	1,00	175
összesen	1575	-	1075

8. táblázat: Alapanyagok térfogata

A keverés után a kapilláris hatások miatt a térfogat várhatóan kisebb lesz. A számításból és kerekítésből adódó hibák elkerülése érdekében a szükséges térfogat 1,2-szeres biztonsági tényezővel került meghatározásra, így a szükséges minimális térfogatot a habarcstartályra vonatkoztatva 1300 cm^3 alakítottam ki.

A habarcstartó henger kialakításakor figyelembe vettem, hogy a habarcstest súlypontjában szükséges a hőmérséklet mérést megvalósítani így a magasságát és a henger átmérőjét közel azonosra vettem.

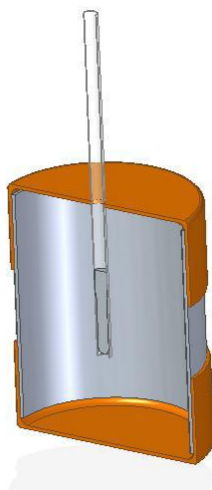
A kereskedelemben kapható átmérőkhöz igazítva a választott geometria a 110 mm belső átmérőjű, 130 mm magasságú PVC anyagú cső lett. A PVC cső mindkét oldalát a hozzá, szintén kereskedelmi forgalomban kapható kupakkal zártam le.

Az alsó zárókupak vízhatlan rögzítése építési ragasztóval történt. A felső zárókupakon 8 mm-es furatot készítettem, melyen be lehet vezetni a hőmérsékletmérő érzékelőt. A 8 mm-

es furatba illeszkedő műanyag cső segítette a hőmérsékletmérő érzékelő habarcs mintába való bevezetését és tette lehetővé annak mérést követő kihúzását a megszilárdult habarcsból. A pontosabb hőmérséklet mérés miatt a műanyag cső ioncserélt vízzel feltöltése biztosította a hővezetést.

A felső kupak és a műanyag cső esetében vízhatlan plasztikus tömítőanyagot használtam a keverővíz tartályból való párolgásának megakadályozására.

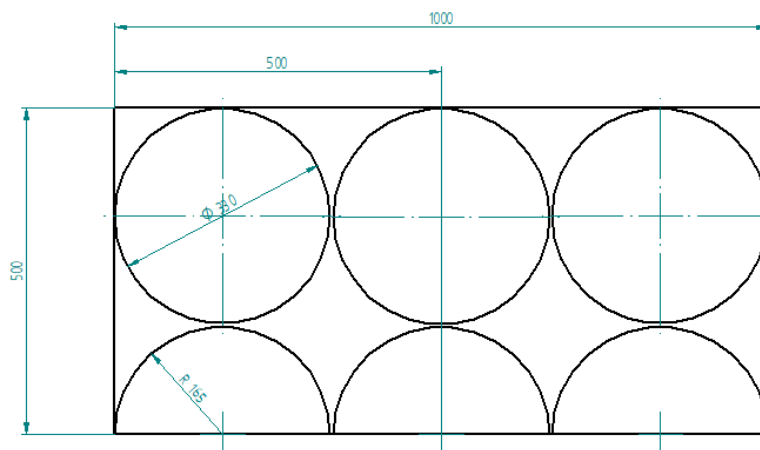
A habarcstartály végleges konstrukcióját a 23. ábra mutatja be.



23.ábra: A habarcstartály

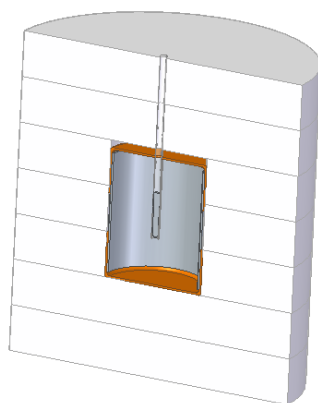
2.1.1.2 A hőszigetelés kialakítása

A hőszigetelés anyagának kiválasztásakor az anyag hővezetési tényezője a legjellemzőbb adat. Ezen felül a megmunkálhatóság és a gazdaságosság lett még figyelembe véve. A műanyag hőszigetelő habanyagok alapvetően expandált és extrudált technológiával készülnek. Az expandált polisztirol hab (EPS) és az extrudált polisztirol (XPS) hab hővezetési tényezője közel azonos, azaz $\lambda=0,038 \text{ W/(mK)}$. A külső hőszigetelő tartály kialakítására mindkét anyag alkalmasnak mutatkozott. A lépésálló expandált hőszigetelő lap (EPS) megmunkálhatósága kiváló, erre esett a választásom. Az EPS lapok különböző vastagságban kaphatók, a konstrukcióhoz az 50 mm vastagságút használtam. A tartály geometriája szintén hengeres kialakítású lett, amelyben a habarcstartály elhelyezhető. Az EPS tartály külső átmérője 330 mm lett, magassága 350 mm. A kereskedelmi forgalomban lévő EPS lapok táblamérete 500 x 1000 mm, a vágási tervet a 24. ábra szemlélteti.



24. ábra: EPS tábla vágási terve

A külső hőszigetelő tartály végleges kialakításánál a rendező elv az volt, hogy a habarcsstartály minden irányból legalább 100 mm-es hőszigetelő réteggel legyen burkolt a féladiabatikus rendszer megvalósításának érdekében, így a kialakult végleges konstrukciót a kaloriméter esetében a 25. ábra szemlélteti.



25. ábra: A kaloriméter metszetben

2.1.1.3 A hőmérsékletmérés

A hőmérséklet mérésére a szabvány szerint legalább 19 °C és 75 °C közötti hőmérséklet tartománnyal bíró érzékelő szükséges, amely vízálló kell legyen. Ezt a követelményt a PT 100 és PT 1000 platina ellenállás hőmérők kielégítik, viszont napjainkban széleskörben elterjedt a digitális hőérzékelők alkalmazása. Ezek az érzékelők egyrésztől sok esetben olcsóbbak, másrésztől egy bementre több hőelem is beköthető, mivel minden lekérdezéskor a gyártási azonosítóját is elküldi a szenzor a hőmérséklet és a jelátvitel megfelelőségének ellenőrizhetőségére szolgáló CRC kód mellett.

A kiválasztott szenzor és a PT100-as elven működő érzékelő tulajdonságait a 9. táblázat foglalja össze.

	PT100	DS18B20
Üzemi hőmérséklet	-50°C ... +250°C	-55...125°C
Mérési pontosság	kalibrálás függvénye	-10°C és +85°C között: $\pm 0.5^\circ\text{C}$
Kialakítás	3 vezetékes, rozsdamentes acélhüvely, vízálló	vízálló rozsdamentes acélhüvely
Méret	6 x 50 mm	6 x 50 mm
Feszültség tartomány	-	3...5.5V

9. táblázat: Hőelemek tulajdonságai

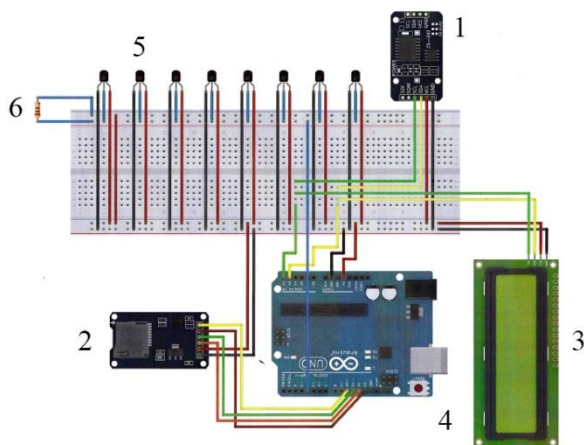
A táblázat szerint a DS18B20 pontossága [53] szerint nem megfelelő, de az egymáshoz kalibrálást különböző állandó hőmérsékletekhez el lehet végezni. Az így felvett hibafüggvény és kompenzáció után a szenzor ismételhetősége és reprodukálhatósága a kívánt tartományon belül helyezkedik el.

2.1.1.4 A mérési adatgyűjtő

A mikroprocesszoros vezérlésű mérési adatgyűjtő kiválasztásakor egyik fő szempont volt, hogy a bemenetek számától függetlenül nagy számú párhuzamos mérést lehessen elvégezni. A digitális hőmérő segítségével a hagyományosan használatos adatgyűjtőkel szemben Arduino Uno segítségével digitális bemenetenként 128 hőmérséklet mérő szenzor lekérdezésére nyílt lehetőség.

A mérési metodikából adódóan habarcsminták számánál kettővel több hőelemre van szükség: a minta mellett egy úgynevezett referencia kaloriméteres hőmérsékletmérésre (megkötött habarcs kaloriméteres vizsgálat) és külső hőmérséklet mérésre.

Az adatgyűjtésre alkalmazott kapcsolás első megoldását a 26. ábra mutatja be.

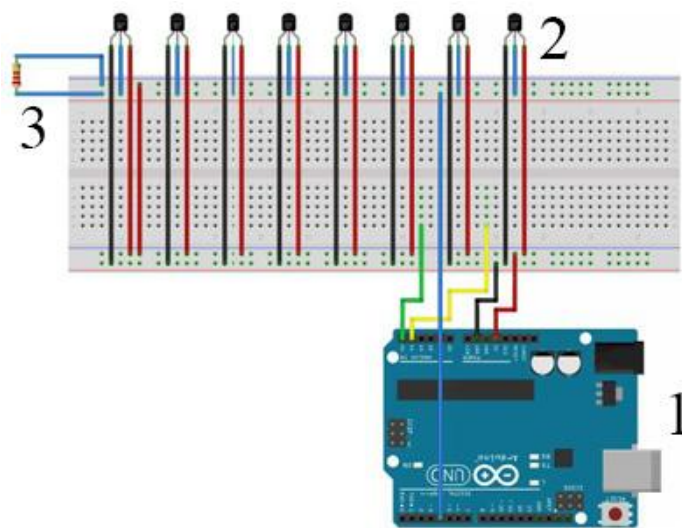


26. ábra: A mérési adatgyűjtő összeállítási rajza

A rendszer részei: 1 - DS3231+AT24C32 RTCM típusú valós idejű memória modul, 2 – MICROSD-M típusú memóriakártya olvasó, 3 -Serial I2C 1602 16×2 Character LCD Module típusú kijelző, 4 – Arduino Uno mikrokontroller, 5 - DS18B20-2M típusú hőmérsékletmérő szenzor, 6 - 4,7 kOhm-os ellenállás.

A fenti összeállítás esetén a mérési időpontok és a hozzá tartozó hőmérsékleti adatok SD kártyán kerültek rögzítése. Az első tesztek alapján – mivel egy mérés tervezett ideje 1 hét – a rendszer a mikrokontroller hobby célra felhasználása miatt nem volt minden esetben megfelelően stabil működésű, másrésről az adatrögzítés ideje (lekérdezés, fájl megnyitása SD kártyán, adat rögzítése, fájl bezárása) az időmérő modul pontatlanságát okozta, így a mikrokontroller egyes feladatait más eszközzel kellett megoldani.

A mérési adatgyűjtő második és egyben végleges kialakítását az 27. ábra szemlélteti. A rendszer részei: 1 – Arduino Uno, 2 - DS18B20-2M típusú hőmérsékletmérő szenzor, 3 - 4,7 kOhm-os ellenállás. A mikrokontroller feladata egyedül a digitális hőmérők nyers adatainak olvasása és továbbítása a számítógépnek. A további feladatokhoz Matlab programcsomag Arduino panel illesztési lehetőségét használtam. Az adatok, amelyek mátrixos alakban rögzítésre kerültek: mérés sorszáma, lekérdezés időpontja, eltelt idő és hőmérséklet.



27. ábra: A végleges mérési adatgyűjtő összeállítási rajza

A fenti összeállítással a mérések stabilitása nagymértékben nőtt és a lehetséges 128 szenzorból mérésenként 8 szenzorral 10 másodpercenként 168 órán keresztül sikerült adatokat gyűjteni.

2.2 Az egyedi fejlesztésű kaloriméterben végzett mérés eredményeinek felhasználása

2.2.1 CEM III és a CEM I típusú cementek összehasonlítása

A mérnöki gyakorlat tömegbeton szerkezet készítéséhez a CEM III típusú kis hőfejlesztésű cementet használja. A CEM I típusú cementek használata a szerkezetek szilárdsági követelményeit jobban kielégítik, de a magas hőfejlesztése miatt tömegbeton szerkezetek készítése esetén alkalmazásuk nem javasolt. A CIRIA C600 szabvány szerint a beton belseje és a felszíne között kialakuló maximális hőmérsékletkülönbséget 19,9 °C-ban maximálható, hogy a szerkezetben ne alakuljon ki a repedéshez vezető veszélyes állapot. A CEM I típusú cementek esetében a hőtermelés majdnem kétszerese a tömegbetonok készítéséhez javasolt CEM III típusú kohósalak cementekhez képest.

A két fajta cementet egy 1 m x 1 m x 1m -es beton modellen vizsgáltam ANSYS végelelemes programmal. A cement fajhője 1228 (J/kgK), a hővezetési tényező 3,5 W/(mK), a frissbeton kezdeti hőmérséklete 20 °C volt. A szimuláció során a modell hőszigeteléssel ellátott esetét vizsgáltam, így a konvektív hőtranszport együttható értékét 5 W/(m²K)-ben vettem fel. A modell nyolcadát vizsgáltam a számolási időt lerövidítendő [67].

2.3 A kutatási terv végelelemes analízis módszerére

A hazai és nemzetközi szakirodalom áttekintését követően a célkitűzésekben megfogalmazott kérdések megválaszolása érdekében beton- és cementhabarcs mintát készítettem és vizsgáltam végelelemes módszerrel. Az így nyert eredményeket a saját méréseim, valamint a Duna Dráva Cement Kft. által készített vizsgálatok eredményeit felhasználva végeztem el a kísérletsorozatot végelelemes analízis módszerével.

1. Állandó környezeti hőmérsékletre vonatkozó vizsgálatok:
 - egy 1 méter élhosszúságú, azaz 1 m³ térfogatú beton hőmérsékleteloszlása téli – nyári időjárási körülmények között, illetve hőszigeteléssel ellátott és anélküli szerkezet esetén,
 - a beton és a talaj kapcsolata, a talaj betonra gyakorolt hatását,
 - a beton és a környezet (levegő) kapcsolata, a levegő betonra gyakorolt hatása,
 - egy komplex rendszer hőmérsékleteloszlása, amely a beton – talaj- levegő kapcsolatát írja le.

2. Változó környezeti hőmérsékletre vonatkozó vizsgálatok:

- egy 1 méter élhosszúságú, azaz 1 m³ térfogatú beton hőmérsékleteloszlása, változó környezeti hőmérséklet esetén.

3. Vasbetonra vonatkozó vizsgálatok:

- a vasbeton szerkezetek hőmérsékleteinek alakulása a betonacél befolyásoló hatásának elemzése,
- az eltérő mennyiségű betonacélok vasbeton szerkezetekre gyakorolt hatása.

A fenti vizsgálatokhoz a Duna-Dráva Cement Kft. (DDC Kft.) által részemre bocsátott cement minták és a hozzá tartozó (a DDC Kft által készített) szabványos méréseken alapuló mérési eredményeket használtam fel.

2.3.1 Az analízis során alkalmazott anyagok tulajdonságai

A vizsgálatok során alkalmazott beton, cementhabarcs, betonacél, talaj és levegő anyagjellemzőit és a vizsgálatok peremfeltételeit a 11. táblázat foglalja össze. A táblázatban található adatok szakirodalmi adatok.

Anyagjellemzők	Beton [42]		Talaj [63]		Betonacél
Fajhő (c_p) [J/(kgK)]	1228		1140		434
Hővezetési tényező (λ) [W/(mK)]	1,28		0,75		60,5
Testsűrűség (ρ_t) [kg/m ³]	2400		1400		7850
Peremfeltételek	Hőszigetelés		Évszak		-
	van	nincs	tél	nyár	-
Konvektív hőtranszport együttható (h) [W/m ² K]	5	30	-	-	-
Környezeti hőmérséklet [°C]	-	-	5	30	-

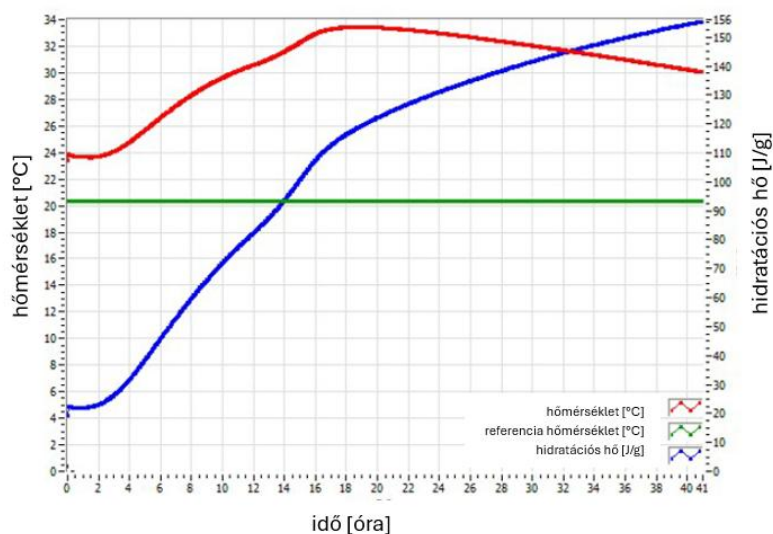
ahol: a betonacél fizikai jellemzői esetén az Ansys programban alapértelmezett értékeit használtam.

11. táblázat: a vizsgálatoknál alkalmazott anyagok anyagjellemzőinek és peremfeltételeinek összefoglalása

2.3.2 A cement

A Duna Dráva Cement Kft.- től kapott cement mintákat jellemzi a keverék hidratációs hőjére vonatkozó kaloriméteres mérési eredmény. A kaloriméteres méréshez használt

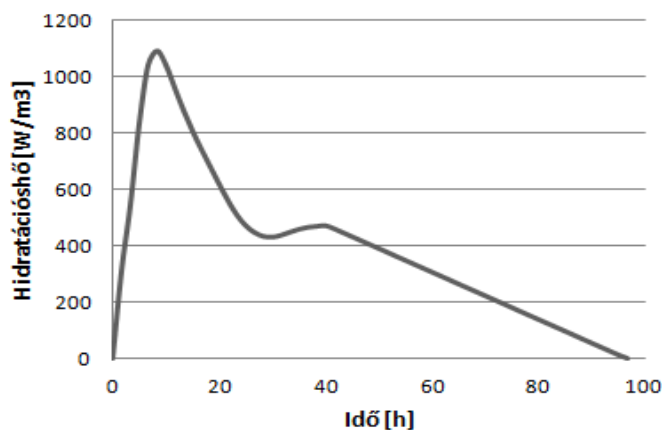
cementhabarcs minta 350 gramm cementet, 1050 gramm szabványhomokot és 175 gramm vizet tartalmazott.



28. ábra: Duna Dráva Cement Kft.- től kapott cement mintákhoz tartozó vizsgálati eredmény

A mérési eredmények a referencia hőmérsékletet, a cementhabarcs minta hőmérsékletét és hidratációs hőjét tartalmazzák. Ezt a mérési eredményt a 28. ábra mutatja be.

A vizsgálataim során alkalmazott cement CEM III B 32,5 N jelű kohósalak cement. A speciális cementet a gyártó (Duna Dráva Cement Kft.) nagy tömegű betonozáshoz ajánlja, amely mérsékelt kezdőszilárdság és jelentős utószilárdulás mellett igen kis hőfejlesztés jellemzi. A CEM III B 32,5 N jelű cement hőtermelését a gyártó által készített szabványos kaloriméteres mérése alapján vettem figyelembe. A mérési eredményekből készült függvény a 29. ábrán látható.



29. ábra: A CEM III B 32,5 N cement hőtermelése az idő függvényében

A rendelkezésemre bocsátott kaloriméteres vizsgálatok 41 órára vonatkoztak, amelynek mérési pontjait megritkítottam és egy az Ansys-ban is használható, 100 órás időtartamra vonatkozó függvényt illesztettem rá.

2.3.3 A végeselemes analízis módszere, a mérések

A hőmérsékleteloszlás analízisét Ansys 12.0 programcsomag segítségével végeztem el.

A bemeneti paraméterek az analízis típusából, az elemzés típusából és a referencia hőmérsékletből tevődnek össze. Az elemzés típusa - „Transient Thermal” – a terhelések változásait és a peremeltételek időbeni változását veszi figyelembe. Az alapvetően szükséges mennyiségek a kezdeti hőmérséklet, a hőáram és a hőmérsékleti gradiens. Az analízis során a program a létrehozott háromdimenziós elemek közötti kapcsolatot vizsgálja. A számoláskor PLANE 70 – 3D, Thermal Solid szilárd elemeket alkalmaztam.

A tranziens analízishez szükséges megadni referencia, azaz kezdeti hőmérsékletet, mert ez befolyásolja a következő időpillanatban kialakuló hőmérséklet változását. Ez a referencia hőmérséklet a frissbeton kezdeti hőmérséklete (zsaluzatba kerülésének időpontjában) 25 °C volt.

Az analízis során a 12. táblázatban bemutatott anyagjellemzőket, a CEM III típusú cement hőtermelési függvényét (30. ábra) használtam a számításokhoz. Az egyes tematikákat követve, ahol a vizsgált geometria, modellezési térfogat, szilárdtestek darabszáma és hálózása eltért azt az adott fejezetben külön kiemelem.

A kezdeti- és peremfeltételek, valamint a vizsgálat tehát az alábbi elemekből tevődtek össze:

- geometriai modell, azaz a vizsgált térfogat,
- számítási tartomány,
- szilárdtest(ek) darabszáma,
- szilárdtest(ek) hálózása,
- környezeti hőmérséklet,
- frissbeton bedolgozási hőmérséklete.

A felsoroltakból állandónak tekintettem minden vizsgálat során a környezeti hőmérsékletet, amely 20°C, továbbá a frissbeton bedolgozási hőmérsékletét, amely 25°C volt. Ettől eltérően felvett kezdeti – és peremfeltételeket az adott kutatási témánál külön kiemelem.

2.3.4 Különböző méretű betontestek összehasonlítása CEM III típusú cementből készült beton esetén

A féladiabatikus kaloriméterben mért eredmények felhasználásával az adott CEM III típusú cementből készült különböző méretű betontest hőmérsékleti viselkedését vizsgáltam végeselemes módszerrel. A kaloriméteres mérés eredményét felhasználva a kísérletterv a következők szerint alakult.

Geometriai modell, azaz a vizsgált térfogatot különböző élhosszúságú kockán vettem fel. A betonszerkezet méreteit a 10. táblázat foglalja össze.

Élhossz [m]	Térfogat [m ³]
0,5	0,125
0,75	0,422
1	1
1,25	1,953
1,5	3,375

10. táblázat: a betonszerkezet méretei

- modellezési térfogat: vizsgálati térfogatnak a nyolcada került modellezésre, ahol a folytonossági kritériumokat peremfeltételek segítségével definiáltam,
- szilárdtest(ek): 1 db beton test,
- szilárdtest(ek) hálózása: közepes (elemméret: 4,17 cm),
- környezeti hőmérséklet: állandó (20°C),
- frissbeton bedolgozási hőmérséklete: 20°C.

A továbbiakban tehát a kaloriméteres mérések vizsgálati eredményeit felhasználva mutatom be a végeselemes analízis módszerével elvégzett kutatásaimat illetve az eredményeket [68].

2.4 A beton próbatest hőmérsékleteinek alakulása

A teljes faktoros kísérletterv meghatározásakor figyelembe vettem a gyakorlatban kialakuló lehetséges környezeti hőmérsékleteket, illetve a hőszigetelési megoldások értékeit. A kísérletterv egy 6x6-os mátrixban (12. táblázat) felírható, ahol:

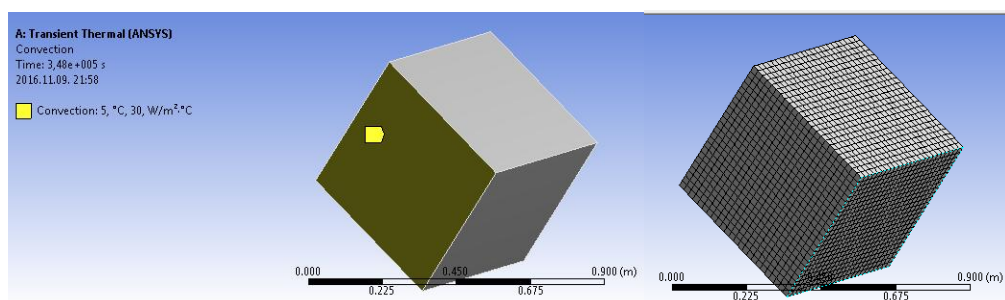
- a konvektív hőtranszport együttható (h) értéke 5 W/m²K (maximális hőszigeteléssel ellátott) és 30 W/m²K (hőszigetelés nélküli) között lineárisan változik,

- a környezeti hőmérséklet (T) értéke 5 °C (téli betonozás) és 30 °C (nyári betonozás) között lineárisan változik.

	konvektív hőtranszport együttható [W/m ² K]						
		5	10	15	20	25	30
$T_{\text{környezeti}}$ [°C]	5	x	x	x	x	x	x
	10	x	x	x	x	x	x
	15	x	x	x	x	x	x
	20	x	x	x	x	x	x
	25	x	x	x	x	x	x
	30	x	x	x	x	x	x

12. táblázat: A kísérletterv faktorok szintjei

A vizsgálat során a 2. fejezetben ismertetett anyagjellemzőkkel, kezdeti- és peremfeltételekkel dolgoztam, ahol a téli és nyári betonozás, valamint a hőszigeteléssel ellátott és hőszigetelés nélküli beton próbatest különböző rétegeiben néztem meg a hőmérsékletek alakulását.



30. ábra. A geometriai modell, valamint a kezdeti- és peremfeltételek és hálózás

Az analízis bemeneti paramétereit az alábbiak szerint alakult:

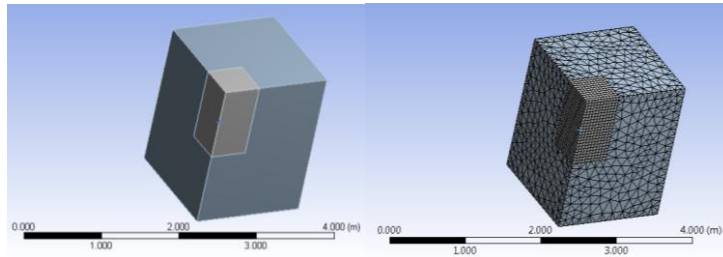
- geometriai modell, azaz a vizsgált térfogat 1 m³, amely 1 m x 1 m x 1 m-es kocka,
- számítási tartomány: vizsgálati térfogatnak a nyolcada került modellezésre, ahol a folytonossági kritériumokat peremfeltételek segítségével definiáltam,
- szilárdtestek és hálózás: 1 db – beton (30. ábra), közepes hálózás (általános elemméret: 4,17 cm).

2.5 Tömegbeton szerkezetek hőmérsékleteloszlása a talajban

A tömegbeton és a talaj kapcsolatát, azaz a talaj hőelvonó hatását a levegőtől függetlenül vizsgáltam meg.

- geometriai modell, azaz a vizsgált
 - o beton térfogat 1 m³, amely 1 m x 1 m x 1 m-es kocka.

- talaj 9 m^3 , amely $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ -es kocka,
- számítási tartomány: vizsgálati térfogatnak a nyolcada került modellezésre, ahol a folytonossági kritériumokat peremfeltételek segítségével definiáltam,
- szilárdtestek és hálózás: 1 db beton és 1 db talaj, ahol a beton és a talaj szilárdtestek felső síkja egy vonalba esik, a szilárdtestek egymáshoz képesti elhelyezkedését a 31 a.) ábra szemlélteti, a hálózást a 31 b.) ábra,
- talaj hőmérséklete a vizsgálat kezdetekor: 25°C .



31 a.) és b.) ábra: A talaj és beton szilárdtest egymáshoz képesti elhelyezkedése és hálózása

2.6 A talaj és a levegő hatása a betonra

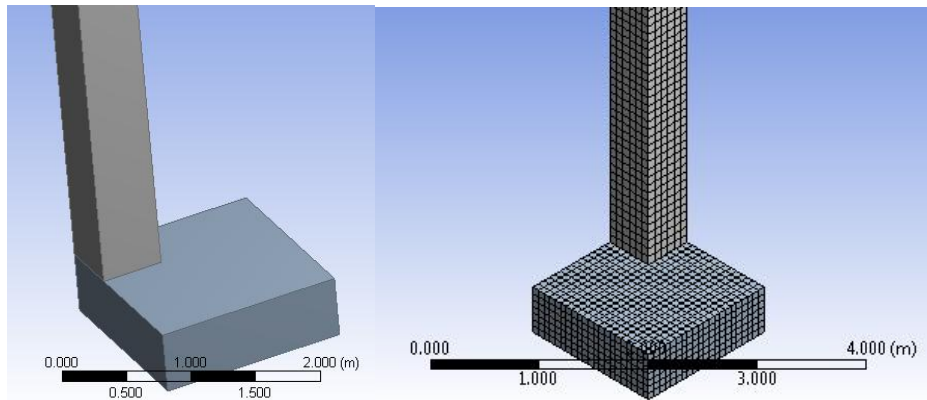
A korábbiakban bemutatott modelleket egy komplex rendszerben kezelve végeztem elemzést, ahol a beton, a talaj és a környezet (levegő) is szerepet kapott.

Jelen esetben arra kerestem a választ, hogy milyen optimális magasságú az az $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ alapterületű hasáb, amelynél a külső tényezők (levegő és talaj által elvont hő) hatása egymástól szétválasztva vizsgálható.

A geometriai modell alapegységeként az $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ -es alapterületű hasábot tekintettem, melynek optimális magasságát kívánom meghatározni. Ennek tekintetében a kiindulási geometria két szilárd testből (beton és talaj) épült fel, ahol a talaj $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ -es alapterületű, $0,5 \text{ m}$ vastag hasáb, közepes finomságú hálózással (33. ábra). Az analízis során az $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ -es alapterületű beton modellt 3 ill. 10 m -es magassággal vizsgáltam.

- geometriai modell (34. ábra), azaz a vizsgált
 - beton térfogat $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ alapterületű négyzet 3 méter, illetve 10 méter magas oszlopként
 - talaj $1,125 \text{ m}^3$, amely $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ -es hasáb,
- számítási tartomány: vizsgálati térfogatnak a negyede került lemodellezésre, ahol a folytonossági kritériumokat peremfeltételek segítségével definiáltam,

- szilárdtestek és hálózás: 1 db beton (elemméret: 7,14 cm) és 1 db talaj (általános elemméret: 7,14 cm), ahol a szilárdtestek egymáshoz képesti elhelyezkedését és a hálózást a 32. ábra szemlélteti,
- talaj hőmérséklete a vizsgálat kezdetekor: 25°C.



32. ábra: A modell kiindulási geometriája és hálózása

2.7 Változó környezeti hőmérséklet hatása a tömegbeton szerkezet hőmérsékleti mezőjére

Ebben a fejezetben a változó környezeti hőmérséklet betonra gyakorolt befolyásoló hatását ismertetem.

A kezdeti- és peremfeltételeket az alábbiak szerint adtam meg.

- geometriai modell, azaz a vizsgált térfogat 1 m³, amely 1 m x 1 m x 1 m-es kocka,
- számítási tartomány: vizsgálati térfogatnak a nyolcada került lemodellezésre, ahol a folytonossági kritériumokat peremfeltételek segítségével definiáltam,
- szilárdtestek és hálózás: 1 db – beton (36 ábra),
- környezeti hőmérséklet: $T = 20^{\circ}\text{C}$ és változó (1) szerint,
- frissbeton bedolgozási hőmérséklete: 20°C.

A végeselemes módszer a Fourier-törvényen alapul, beleértve az exoterm hidratációs reakcióból eredő belső hőtermelést.

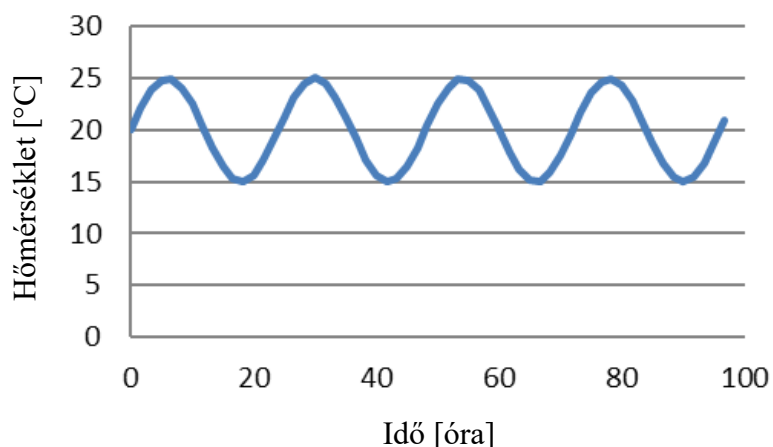
A peremfeltételekre vonatkozóan a szimuláció során két esetet vizsgáltam. Az első esetben a környezeti hőmérséklet $T = 20^{\circ}\text{C}$ a kiinduláskor és az is maradt a vizsgálat során végig. A második esetben a környezeti hőmérséklet $15^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$ között változott, nyári betonozást szimulálva. Ez utóbbi esetben a változó környezeti hőmérsékletet az (1) egyenlettel határoztam meg.

$$T(t) = T_{amp} \sin\left(\frac{2\pi}{24}t\right) + T_{avg}$$

ahol

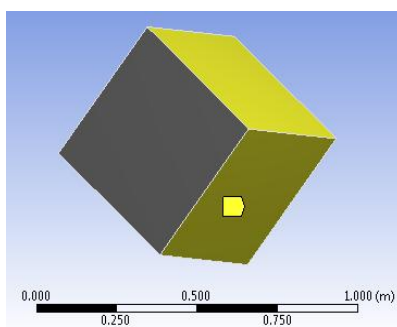
- T_{amp} a hőmérséklet-változás amplitúdója °C-ban,
- t az idő órában,
- T_{avg} a napi középhőmérséklet °C-ban.

A periódikus hőmérséklet függvény a 33. ábrán látható, amely a napi hőmérséklet ingadozást reprezentálja.



33. ábra: A környezeti hőmérséklet változása az idő függvényében

A vizsgált modellben (34. ábra) a konvektív hőtranszport együtthatót $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ értéken állandónak tekintettem.



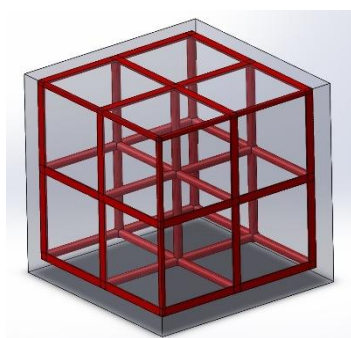
34. ábra: A nyolcad-modell $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ értékű konvektív hőtranszport együttható értékkel a sárgával jelölt felületeken

2.8 A betonacél befolyásoló hatásának vizsgálata

A vizsgálat során egy vasbeton szerkezet hőmérsékleteloszlását vizsgáltam, arra keresve a választ, hogy a betontestben kialakuló minimum és maximum hőmérsékletek, ill.

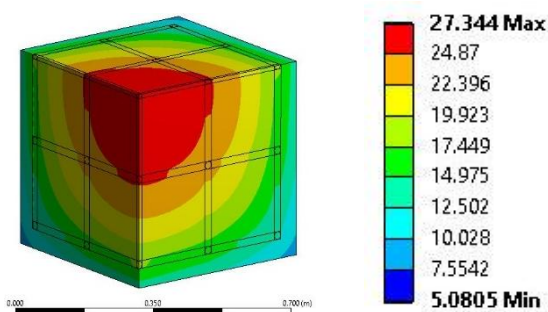
hőmérsékletkülönbség hogyan változik betonacéllal erősített és betonacél nélküli tömegbetonok esetén.

- geometriai modell, azaz a vizsgált térfogat 1 m^3 , amely $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ -es kocka,
- betonacélok: 20 mm átmérőjű, 225 mm-es egyenletes osztásközzel elhelyezve, betontakarással,
- számítási tartomány: vizsgálati térfogatnak a nyolcada került lemodellezésre, ahol a folytonossági kritériumokat peremfeltételek segítségével definiáltam,
- Szilárdtestek és hálózás: 1 db – beton és 1 db betonacél, hálózás általános elemmérete: 4,17 cm (35. ábra).



35. ábra: A betonacélok elhelyezkedése a nyolcadmodellben

A beton modellt a 2.4 fejezet részletesen ismerteti, a vasbeton modellt a 36. ábra mutatja be.

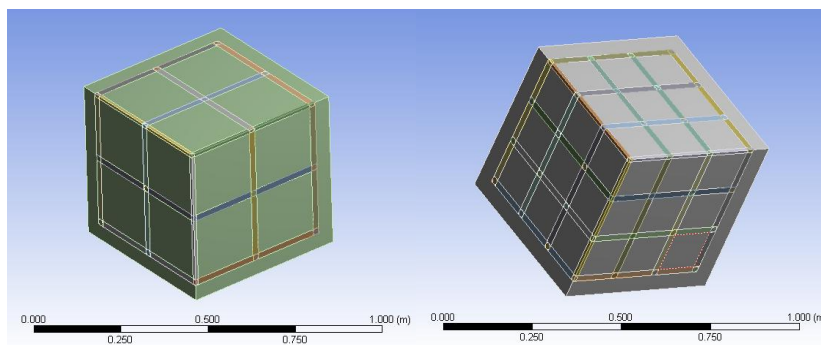


36. ábra: A vasbeton modell szimmetriasíkjában a hőmérséklet eloszlás $h=30\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, valamint $T=5^\circ\text{C}$ esetén

2.9 A betonacél befolyásoló hatásának elemzése eltérő mennyiségű betonacél esetén [66]

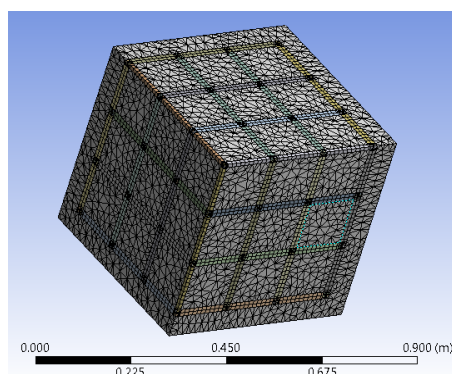
A 2.8 fejezet eredményei alapján megállapítottam, hogy alacsony környezeti hőmérséklet és magas konvektív hőtranszport együttható esetén is befolyásoló hatással van a modell hőmérsékleteloszlására a betonacél. Ebben a fejezetben azt mutatom be, hogy eltérő mennyiségű betonacélok alkalmazása milyen hatással bír. A korábban alkalmazott 225 mm-es osztásközt sűrítve, 145 mm-es betonacél távolsággal is elvégeztem az elemzést.

- geometriai modell, azaz a vizsgált térfogat 1 m^3 , amely $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ -es kocka,
- betonacélok: 20 mm átmérőjű, 225 mm-es és 145 mm-es egyenletes osztásközzel elhelyezve, betontakarással (37. ábra),
- számítási tartomány: vizsgálati térfogatnak a nyolcada került lemodellezésre, ahol a folytonossági kritériumokat peremfeltételek segítségével definiáltam,
- szilárdtestek: 1 db – beton és 1 db betonacél.



37. ábra: A betonacélok elhelyezkedése a modellben 225 mm és 145 mm osztásközzel

A geometriai modell két szilárdtestet tartalmaz - beton és betonacél - azonos finomságú hálózással és peremfeltételekkel. A hálózás méretét tekintve a pontosabb eredmények érdekében finomhálózást (38. ábra) választottam az elemzéshez.



38. ábra: A végelem modell finomhálózása

3. VIZSGÁLATOK ÉS EREDMÉNYEK

A fejezet első felében egy egyedi fejlesztésű kaloriméter és a berendezéssel készült vizsgálatok eredményei kerülnek bemutatásra. Ezt követően állandó környezeti hőmérsékleten végzett vizsgálatokat ismertetem, a beton, talaj és levegő kapcsolatát bemutatva. A fejezet utolsó fejezete a változó környezeti hőmérséklet befolyásoló hatását mutatja be.

3.1 Egyedi kaloriméter fejlesztése

A berendezés megtervezését és összeállítását követően annak kalibrálására és hőveszteség kompenzálására volt szükség.

3.1.2 A kaloriméter hőtani jellemzőinek meghatározása [64]

A 2.1 fejezetben részletezett konstrukcióban a DS18B20 hőelem bevezetése felülről, a minta közepébe történt. Jellemzőit a 3.10 táblázat foglalja össze. Az alkalmazott hőelem digitális formában küldi el az adatgyűjtőnek a hőmérséklet értékét, a gyári azonosító számát és a küldött adatok CRC kódját. A 10. táblázat alapján pontossága $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, mely pontosság [53] szerint kalibrálás nélkül nem megfelelő. Digitális jelátvitel miatt a hőelem közvetlenül nem kalibrálható adott hőmérsékletre, illetve hőmérsékletekre, így szoftveres kalibrálásra volt szükség. Adatgyűjtésre a 28. ábra szerinti Arduino kapcsolást alkalmaztam.

Az 1 jelű Arduino Uno vezérlő 5-ös bemenete gyűjti össze a 2 jelű hőelemek jelét. A hőelemek úgynevezett egy vezetékes kapcsolásba vannak egymással párhuzamosan kötve. A lekérdezés a hőelem gyártási száma alapján történik. A hőelemek az 5V-os tápellátást a panelről kapják. A 8 darab hőelem adatlábát és a +5V feszültséget egy 4,7 kOhm-os ellenállással kötöttem párhuzamosan, mivel a panel belső ellenállása nem elegendő ennyi szenzorhoz parazita kapcsolási módban.

Az adatgyűjtő feladatainak megvalósítása Matlab Arduino illesztéssel történt. A mikroprocesszoros és a szenzor támogató csomagok segítségével definiáltam a mérések számát, mérés időtartamát, valamint a hőmérséklet lekérdezéseket és az adatrögzítést. 8 érzékelő esetén 3-3,5 másodperc közötti lekérdezési időre volt szükség.

A hőmérők egymáshoz kalibrálása 5000 darab mérési adat felhasználásával, szobahőmérsékletű levegő segítségével történt 10 másodperces mérések közötti intervallummal.

A kaloriméter veszteségének meghatározásakor 8 dl ionizált vizet használtam. A mintatartót közel 80 °C-os hőmérsékletű ioncserélt vízzel töltöttem fel. A hőmérséklet felfutási szakaszát nem használtam a kalibrációhoz, így az adatok 55 °C alatti értékeit vettem figyelembe.

A hőmérsékletváltozás állandó hőszigetelési vastagság esetén az alábbi differenciálegyenlettel írható fel:

$$C_{v\acute{z}}m \frac{dT}{dt} = -kA(T(t) - T_{k\ddot{u}ls\ddot{o}}) \quad (1)$$

ahol:

$C_{v\acute{z}}$: a víz fajhője [J/(kgK)]

$T_{k\ddot{u}ls\ddot{o}}$: környezeti hőmérséklet [K]

$T(t)$: pillanatnyi hőmérséklet [K]

T_0 : kiinduló hőmérséklet [K]

k : hőátbocsátási tényező [W/(m²K)]

A : felület [m²]

m : víz tömege [kg]

t : idő [sec]

Az egyenlet megoldásakor kezdeti feltételként a $t = 0$ sec esetén az egyes hőmérséklet érzékelőknél mérhető hőmérsékletet használtam fel.

Az egyenlet megoldását (2) formában határoztam meg:

$$T(t) = (T_0 - T_{k\ddot{u}ls\ddot{o}})e^{-\frac{kA}{cm}t} + T_{k\ddot{u}ls\ddot{o}} \quad (2)$$

3.1.3 A hőmérséklet kompenzálása a kaloriméter veszteségével

A hőmérséklet mérésekor az első mért hőmérséklet nem szorul kompenzálásra. Minden további hőmérséklet érték a (3) egyenletből meghatározott kA szorzat segítségével kompenzálásra szorul, hogy az adiabatikus szempontból zárt környezetben történő hőmérsékletet, illetve hőtermelést tudjuk jellemezni. A kompenzálás azt mutatja meg, hogy a nulla hőveszteség esetén mennyi a folyamatban termelt hő az idő függvényében.

A hőmérséklet veszteség a féladiabatikus rendszerben:

$$T_{vesztes\acute{e}g}(t = i) = \frac{kA}{c_{ch}m_{ch}} \Delta t \cdot (T_0 - T_{m\acute{e}rt}(t = i - 1)) \quad (3)$$

ahol:

c_{ch} : cementhabarcs fajhője [J/(kgK)]

m_{ch} : cementhabarcs tömege [kg]

i : mérés száma [db]

T_0 : első mérés hőmérséklete [K]

A hőmérséklet pedig adiabatikus rendszerre vonatkozva:

$$T_{kompenzált}(t = i) = T_{mért}(t = i) + \sum_{t=1}^{t=i-1} T_{veszteség}(t) \quad (4)$$

3.1.4 A hőtermelés meghatározása

A cementhabarcs hőtermelését a szakirodalom kétféleképpen definiálja. Szabványos mérési eljárás esetén a hagyományosnak mondható [Joule/gramm] alak az elterjedt, viszont további munka esetén a végeselemes programok bemeneteként többhelyen megtalálható a [Watt/s] mértékegység is. Az alfejezetben ez utóbbi meghatározását mutatom be.

A kompenzált hőmérsékletből számított hőváltozás a (5) egyenlettel történik.

$$\Delta q(i) = c_{ch} m_{ch} (T_i - T_{i-1}) \quad (5)$$

A teljes folyamatra meghatározott hőtermelés (6) szerint:

$$q(t) = \frac{\sum_{i=1}^t \Delta q_i}{t} \rho_{ch} \quad (6)$$

ahol:

$q(t)$: hőtermelés [W/m³]

ρ_{ch} : cementhabarcs sűrűsége [kg/m³]

t : eltelt idő [sec]

3.1.5 A hőérzékelők egymáshoz kalibrálása

A hőmérők kalibrálásakor Az S1 azonosítójú szenzorhoz készítettem el a kalibrációt. A méréskor szobahőmérsékletre végeztem el a számításokat, amely a mérés közben 19°C±0,5°C volt. A mérésekor a hőmérséklet különbségeket használtam csak fel, mivel a későbbi mérésekkor az alapanyagok 24 órás temperáláson estek át.

Az eredményeket a 13. táblázat foglalja össze. Az eltérések az előjelek a referencia értéktől a kisebb vagy nagyobb hőmérsékleteket jelentik. Az átlagos eltérés az 5000 darab mérési eredmény számtani közepéből származtattam.

Azonosító	Eltérés		
	minimális	maximális	átlagos
S1	0 °C	0 °C	0 °C
S2	-0,125 °C	-0,250 °C	-0,197 °C
S3	0 °C	-0,063 °C	-0,034 °C
S4	-0,063 °C	-0,375 °C	-0,255 °C
S5	-0,188 °C	-0,313 °C	-0,236 °C
S6	-0,125 °C	-0,313 °C	-0,234 °C
S7	-0,313 °C	-0,438 °C	-0,396 °C
S8	0,063 °C	-0,063 °C	-0,023 °C

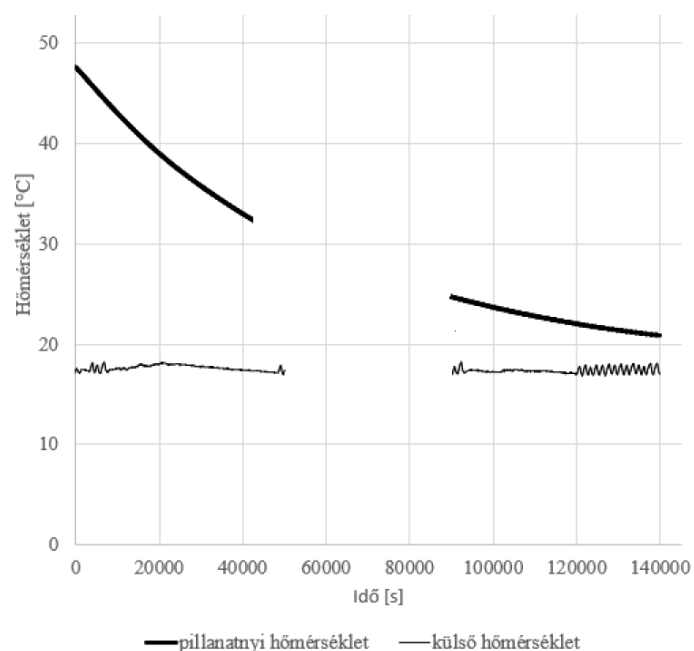
13. táblázat: Hőelemek egymástól való eltérései

3.1.6 A kaloriméter hőveszteségének meghatározása.

A kaloriméterek hőveszteségének meghatározásához légkondicionált termet használtam. A hőveszteség meghatározása számolással a légkondicionált helyiség hőmérséklet változása, valamint a kaloriméter elhelyezéséből adódó egyéb felületek, valamint a nyílászáróknál keletkező sugárzó hő miatt nehézkes.

A méréskor 6 darab kalorimétert használtam, 2 hőelemmel a külső hőmérsékletet mértem (ebből az egyik a további méréseknél tartalékként üzemelt, esetleges hőelem meghibásodás esetén a kiértékelhető mérések számát növelte).

A mérés végét az első kaloriméter belsejének 21 °C alá történő csökkenésének segítségével határoztam meg. A méréskor 14000 mérési pontot rögzítettem (közel 39 óra mérés). A függvényközelítéskor a mérés 1-5000, valamint 9001-14000 pontjait használtam fel. A pontok első intervallumára az exponenciális függvény kezdeti meredekség változásának megfelelő közelítésére, az utolsó 5000 pontra pedig a függvény végtelenbe vett érintője miatt volt szükség. Az adatsorokból egy kaloriméteren belüli szenzor és egy környezeti hőmérsékletet mérő szenzor jelét a 39. ábra szemlélteti.



39. ábra: Hőmérséklet- idő diagram feldolgozáshoz használt alakja

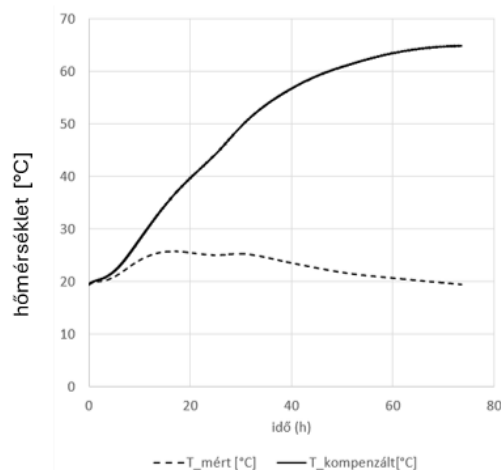
A (3) egyenlet által meghatározott összefüggésben a kA szorzat értékét határoztam meg a felvett hőmérséklet – idő adatokból. A függvényközelítéshez legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztam TRM (Tikhonov Regularization Method) algoritmussal. A közelítéskor a maximális iterációk száma 400 volt. A regressziószámítás eredményeit a 14. táblázat foglalja össze (S3 és S7 érzékelők a szobahőmérsékletet mérték).

Azonosító	kA [W/K]	R^2
S1	0,0599	0,9997
S2	0,06105	0,9998
S4	0,06141	0,9997
S5	0,06119	0,9997
S6	0,05977	0,9997
S8	0,06032	0,9997

14. táblázat: A kA szorzat értékei

A 14. táblázat értékeiből látható, hogy a függvényközelítés szórásnégyzete nagyobb 0,99-nél. A kA szorzatból a továbbiakban számításokat lehet végezni a hőátbocsátási tényezőre vonatkozóan, viszont a további számításoknál nincs szükség külön erre az értékre, így a számításoknál a 14. táblázatban ismertetett szorzatok kerülnek felhasználásra. A kialakított rendszer lehetőséget nyújt arra vonatkozóan, hogy nem csak laborberendezések segítségével megvalósítható legyen a hőtermelés (vagy bármilyen más kémiai folyamat)

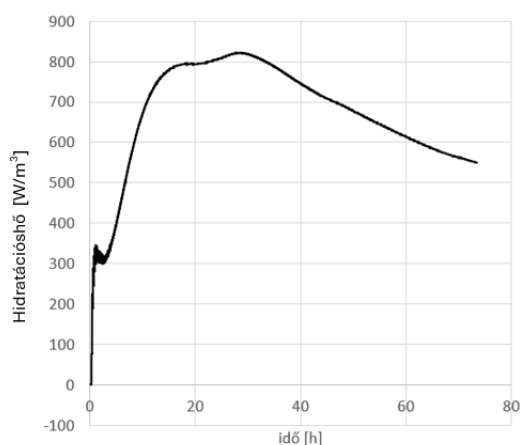
hőtani jellemzése. A kialakított rendszer a kereskedelemben kapható általános célú adatgyűjtőkhöz képest több bemenettel rendelkezik a beszerzési költsége pedig alacsony. A kialakított programvezérlésnek köszönhetően tetszőleges időpontokban lehet leolvasni a szenzorok adatait, szükség esetén az egyes hőmérsékletváltozások (ugrások) érzékelése esetén sűríteni, adott helyeken pedig ritkítani lehet a mérési pontok számát. Az adatok feldolgozása Matlab segítségével akár nagyszámú (több száz ezres) mérési pontok és több bemenet mellett is egyszerűen elvégezhető.



40. ábra: Hőmérséklet- idő diagram CEM III esetén

A CEM III típusú habarcs vizsgálatához az előkészületeket az [41] szerint végeztem. A mérés során az adatokat percenként rögzítettem.

A mérés teljes időtartamát a mérés elején csak becsülni lehetett, így követelményként azt a célt fogalmaztam meg, hogy a mérés végét az 1 órán át nem változó mintahőmérséklet határozza meg.



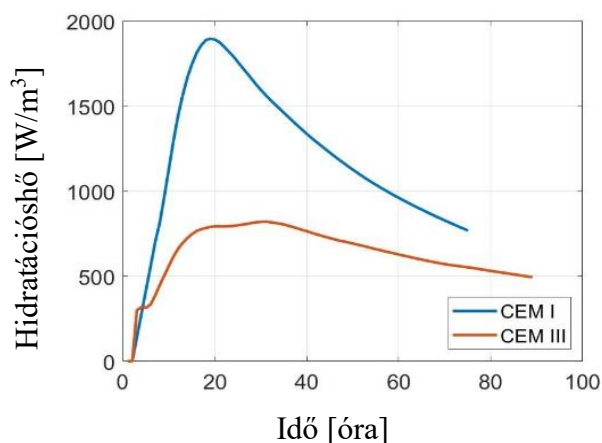
41. ábra: Hőtermelés- idő diagram CEM III esetén

A vizsgálat így 73,5 óra volt. A szigetelt, de adiabatikus szempontból nem teljesen zárt rendszerben a hőmérsékletváltozást a 40. ábra szaggatott vonala jelzi.

A diagramm folyamatos vonalával a hőmérséklet kompenzációs modell alkalmazásának eredménye látható. A (5) és (6) szerinti hőtermelést a 41. ábra szemlélteti. A mérés alapján megfigyelhetők az egymásra épülő kémiai folyamatok, valamint az, hogy a szakirodalom által alátámasztott 25-35 órák között van a CEM III típusú cement maximális hőtermelése.

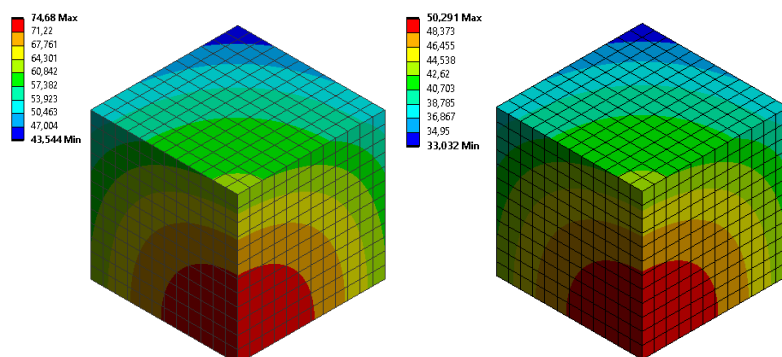
3.2 A CEM III és a CEM I típusú cementek összehasonlítása [67]

Az 2.1 fejezetben bemutatott egyedi fejlesztésű kaloriméterben a CEM I és CEM III típusú cementek hőmérsékleteit mértem meg. A 2.2.1 fejezetben bemutatott kaloriméteres mérésekből kiszámított hidratációs hő a CEM I és CEM III típusú cementekre vonatkoztatva a 42. ábrán került bemutatásra.



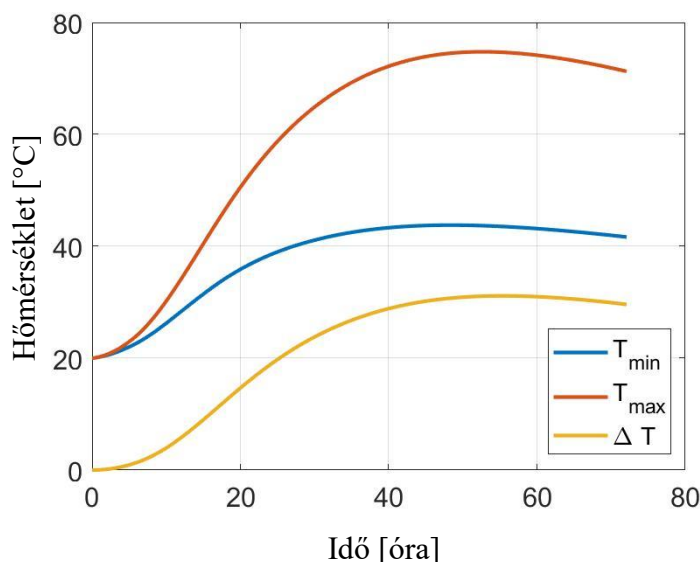
42. ábra: a CEM I és a CEM III hőtermelése $T = 20^{\circ}\text{C}$ és $h = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ esetén

A 43. ábra bal oldalán a CEM I, jobb oldalán a CEM III típusú cementtel készített eredményeket láthatjuk.



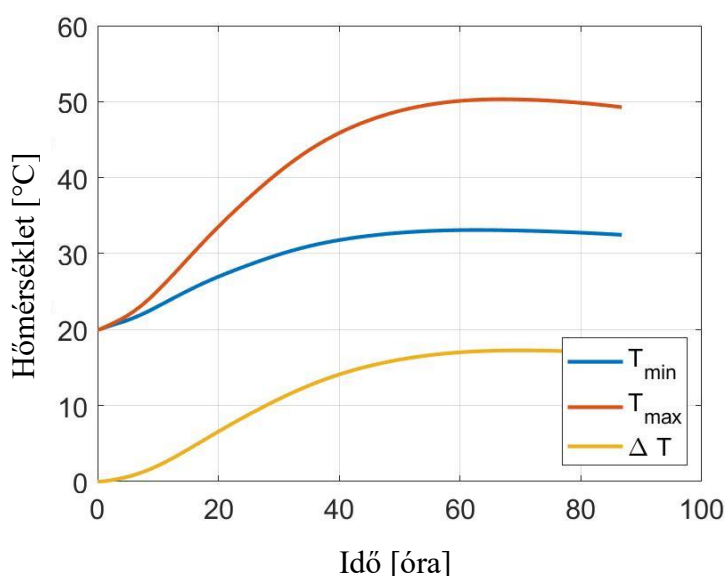
43. ábra: a CEM I (bal oldal) és a CEM III (jobb oldal) típusú cementekkel készült beton modellek hőeloszlása $T = 20^{\circ}\text{C}$ és $h = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ esetén

Az eredményeken jól látszik, hogy a cement hőtermelése nagy mértékben befolyásolja a beton belsejében és a felszínén kialakuló hőmérsékletek alakulását. A CEM I típusú cement esetében a 55,22. órában alakult ki a legnagyobb hőmérsékletkülönbség, amely 31,13 °C volt (44. ábra).



44. ábra: A CEM I minimális és maximális hőmérsékletének, valamint a hőmérsékletkülönbségek alakulása az idő függvényében $T=20^{\circ}\text{C}$ és $h=5\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ esetén

A CEM III cement esetén a 69,7. órában alakult ki a legnagyobb hőmérsékletkülönbség, értéke 17,26 °C volt, a diagram a 45. ábrán látható.

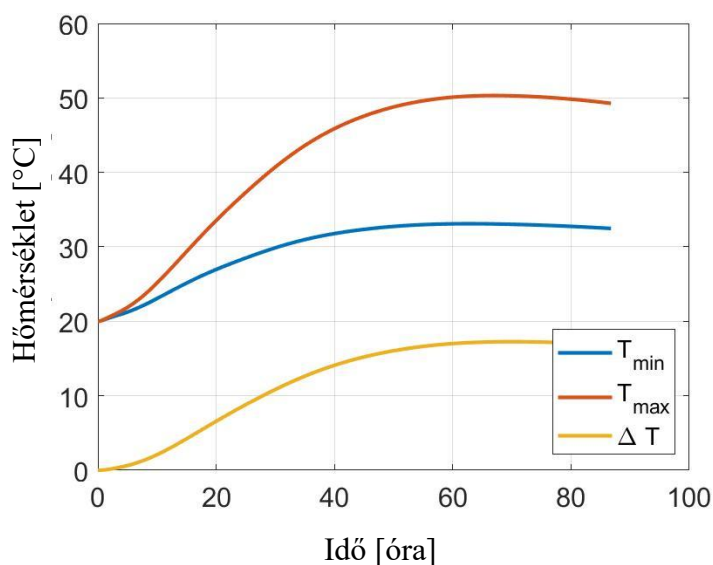


45. ábra: A CEM III minimális és maximális hőmérsékletének, valamint a hőmérsékletkülönbségek alakulása az idő függvényében $T=20^{\circ}\text{C}$ és $h=5\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ esetén

A fenti eredmények is igazolják, hogy a CEM III típusú cement alkalmazása indokolt a tömegbetonok készítésekor, így elkerülhető a szerkezetben kialakuló átmenő repedések létrejötte. A jelen vizsgálat egy nyári betonozást feltételezett (külső hőmérséklet 20 °C), amely esetben a beton zsaluzatán alkalmazott hőszigetelő réteg tette lehetővé a beton belseje és felszíne között kialakuló hőmérsékletkülönbség alacsony értékén tartását. Ugyanezen szituációban a CEM I típusú cementnél a hőmérsékletkülönbség már meghaladta a kritikusnak számító 20 °C-ot.

3.3 Különböző méretű betontestek összehasonlítása CEM III típusú cementből készült beton esetén [68]

A 2.3.3.1 fejezetben ismertetett vizsgálat eredményei. Az elemzés során minden egyes méretű modell hőszigetelt betonként vizsgáltam, így a $h = 5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ konvektív hőtranszport együtthatóval számoltam. Az 1 méteres élhosszúságú beton esetén a hőmérsékletkülönbség 17,25 °C lett, amely hőmérséklet a 69,7. órában alakult ki. Az eredményt a 46. ábra szemlélteti, amely diagramon a hőmérsékleti minimumok, maximumok és a hőmérsékletkülönbség került ábrázolásra.



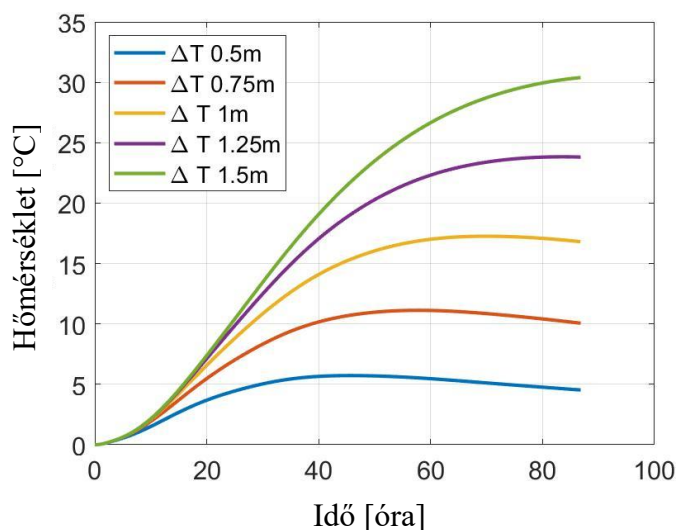
46. ábra: A hőmérsékletváltozás az idő függvényében hőszigetelt beton $T = 20^\circ\text{C}$ és $h = 5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ esetén

A változó méret, ezáltal térfogat hőmérsékletre gyakorolt hatása a 15. táblázatban került összefoglalásra, ahol a maximális hőmérsékletkülönbségek és az ahhoz tartozó időpontok, valamint a az élhossz összefüggéseit láthatjuk.

élhossz [m]	maximális hőmérséklet különbség [°C]	idő [h]
0,5	5,72	45,3
0,75	11,12	57,8
1	17,25	69,7
1,25	23,83	83,1
1,5	30,4	95,3

15. táblázat: A maximális hőmérsékletkülönbségek értékei és annak időpontja a modell élhosszainak függvényében

Az eredmények a 47. ábrán láthatóak.



47. ábra: Az élhossznak a hőmérsékletkülönbségre gyakorolt hatása $T = 20^{\circ}\text{C}$ és $h=5$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ esetén

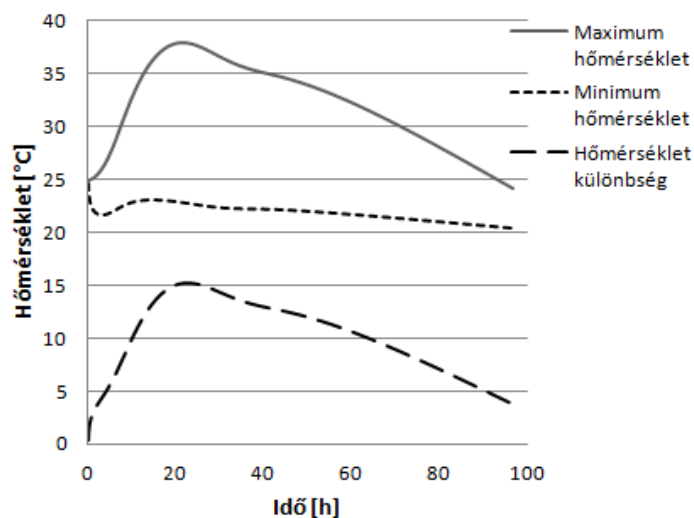
Az eredmények azt mutatják, hogy az azonos kezdeti- és peremfeltételek mellett a maximális hőmérsékletkülönbség és annak időpontja a beton modell méretével együtt változik. Az élhossz növekedése nagyobb hőmérsékletkülönbséget eredményezett a beton belseje és felszíne között kialakuló maximális és minimális hőmérséklet között.

3.4 A beton próbatest hőmérsékleteinek alakulása [65]

A 2.4 fejezetben bemutatott vizsgálat eredményeinek kiértékelésekor a szimuláció során kapott adatsor segítségével az adott időpillanatokban kialakuló minimális és maximális hőmérsékletek alakulását, valamint a maximális hőmérséklet különbséget vettem figyelembe.

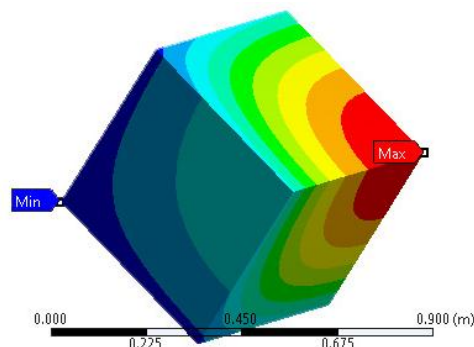
A végeelem modell eredményeiről elmondható, hogy a teljes kötési folyamat során a kocka geometria középpontjának hőmérséklete reprezentálja a legmagasabb hőmérsékletű, a sarkai pedig a legalacsonyabb hőmérsékletű pontokat. A hőmérsékletváltozásokat az idő függvényében a 48. ábra szemlélteti $h=15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $T=20^\circ\text{C}$ esetén.

A kapott eredményekből kiderül, hogy a ΔT hőmérséklet különbséget a hőmérsékleti minimumok kevésbé, a maximumok nagy mértékben befolyásolják. A hőmérsékleti minimumok a kötés kezdetétől számított, jellemzően 5 -6. órában, de legkésőbb a 10-12. órában érik el szélsőértékeiket utána konstans értéket vesznek fel. A hőmérsékleti maximumok viszont a kötés kezdetétől számított 20-22. órában érik el maximumukat és ezt követően lineárisan csökkennek.



48. ábra: Hőmérsékletváltozás az idő függvényében $h=15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $T=20^\circ\text{C}$ esetén

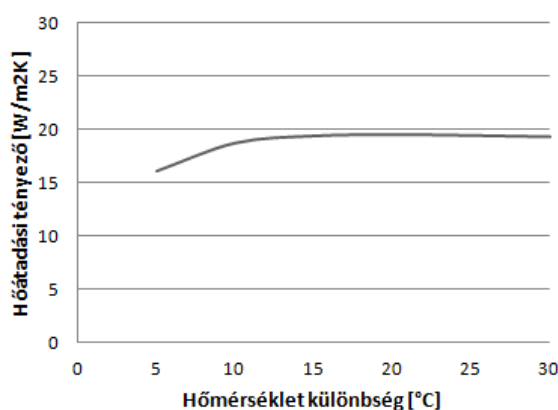
A kiragadott példából is látható, hogy bár a hidratációs hő maximuma (29 ábra) 8 óránál volt, de a repedési hajlamot jellemző maximális hőmérséklet különbség csak a 25. órában jelentkezett.



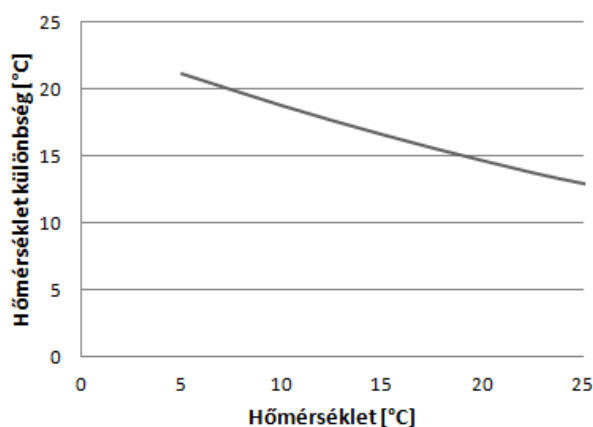
49. ábra: A nyolcad modell szimmetriasíkjában a hőmérséklet eloszlás $h=30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, valamint $T=5^\circ\text{C}$ esetén.

Az azonos hőmérsékletű frissbeton már a kötése után pár órával a külső lapokon felveszi a közel környezeti hőmérsékletet, így jelentős hőmérsékletváltozáson a próbatest belső része (egyenletes hőleadást feltételezve a geometriai közepe) esik át. A szimuláció során igazolást nyert, hogy a maximális hőmérséklet különbség a hőszigetelés nélküli felületet feltételező modell ($h=30 \text{ W/m}^2\text{K}$) esetében a minimális környezeti hőmérséklet ($T=5 \text{ °C}$) mellett alakul ki. A modell szimmetria síkjában történő hőmérsékletváltozást az 49. ábra szemlélteti.

A kísérletterben történő kiértékeléskor arra a kérdésre kerestem a választ, hogy milyen alakú és milyen állandókkal rendelkező célfüggvénnyel tudom jellemezni az előzőekben ismertetett folyamatot. A teljes faktoros kísérletterv változóinak a hőmérsékletre gyakorolt hatását a kísérlettervben definiált tengellyel párhuzamos szakaszok segítségével határoztam meg. A 12. táblázatban összefoglalt kísérletterv egyes oszlopait és sorait reprezentáló metszések a 50. és 51. ábrán láthatóak.



50. ábra: A konvektív hőtranszport együttható alakulása a hőmérséklet különbség függvényében $T=10 \text{ °C}$ esetén



51. ábra: A hőmérséklet különbség alakulása a hőmérséklet függvényében, $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ esetén.

A 50. és 51. ábrán bemutatott eredményekből látható, hogy az adott kísérlethez a hőmérséklet különbség a környezeti hőmérséklettel lineárisan, a konvektív hőtranszport együtthatóval közelítően másodfokúan változik, így az alábbi függvényalakban kereshető a megoldás (a keresztthatások figyelembevétele nélkül):

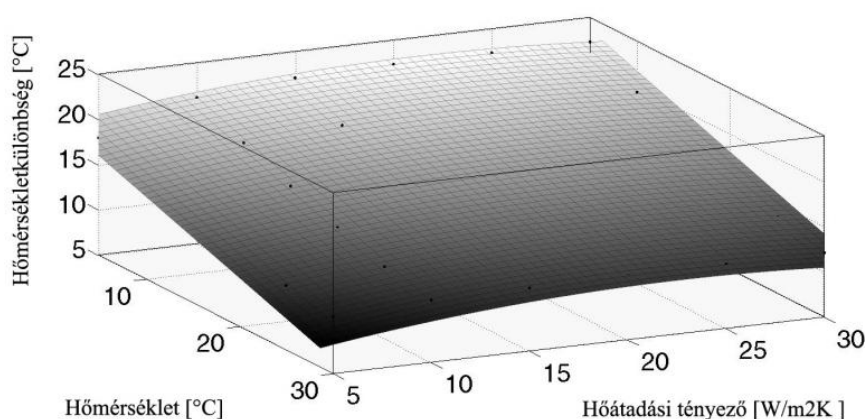
$$\Delta T = a + bT + ch + dh^2 \quad (1)$$

Az általam végzett vizsgálatoknál az állandók értékeit foglalja össze a 16. táblázat. Az a , b , c , d a regressziós függvény (1) paraméterei.

állandó	érték
a	19,24 [°C]
b	-0,3765 [-]
c	0,3839 [°Cm ² K/W]
d	-0,008659 [°Cm ⁴ K ² /W ²]

16. táblázat: Az elemzés során kapott állandók értékei

A felírt függvény és az elemzés során kapott állandók alapján a hőmérséklet különbség (ΔT), a környezeti hőmérséklet (T) és a konvektív hőtranszport együttható (h) kapcsolatát a 52. ábra szemlélteti.



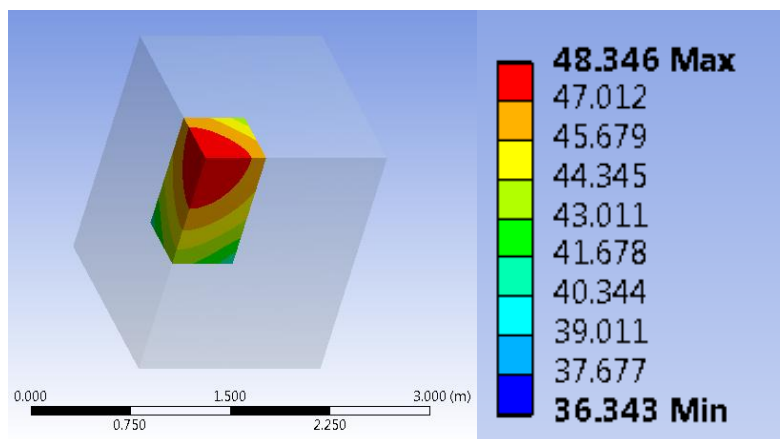
52. ábra: A hőmérséklet különbség, a hőmérséklet és a konvektív hőtranszport együttható kapcsolata (1) szerint

A kialakított célfüggvény a kísérlethez belül bármilyen adott külső állandó hőmérséklet és konvektív hőtranszport együttható esetén lehetőséget nyújt arra vonatkozóan, hogy megállapítsuk a gyakorlati mérnökség számára a hőmérséklet különbséget technológiai próbák elvégzése nélkül. Az így megvalósított repedési hajlam vizsgálat azonnal előre jelzi

a numerikus modell segítségével repedésveszélyt, helyettesítve/kiegészítve a napokon át történő többcsatornás hőmérsékletmérést.

3.5 Tömegbeton szerkezetek hőmérsékleteloszlása a talajban

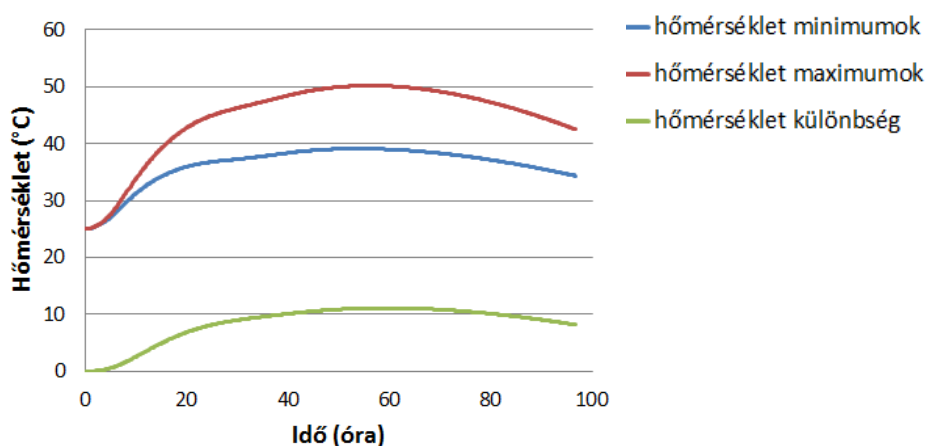
A 2. 5 fejezetben bemutatott vizsgált geometria középpontjában alakult ki a legmagasabb, a sarokpontokon pedig a legalacsonyabb hőmérséklet. A hőmérséklet eloszlását a modellben az 53. ábra szemlélteti, ahol jól látható a talaj hőelvonó hatása.



53. ábra: A hőmérsékletek alakulása a beton próbatestben

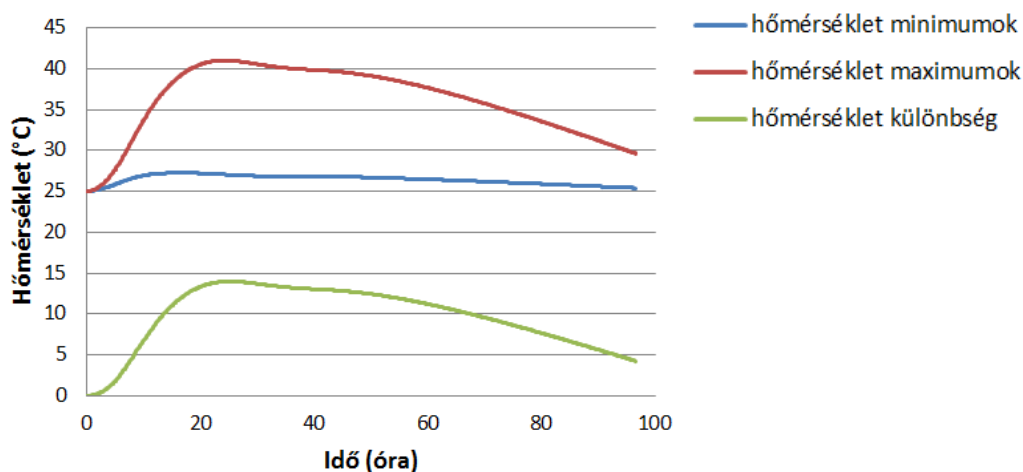
A szimuláció eredményeit a 54., 55., 56. ábrákon található diagramok szemléltetik. A hőmérsékleti minimumok a talajfelszínen az 53,7 órában, amíg a talajban 30 órával később alakulnak ki a beton hőmérsékletét tekintve.

A hőmérsékleti maximumok között 10 óra eltérés van, a talajfelszínen az 56,23 órában, amíg a talajban a 66,7 órában alakulnak ki.



54. ábra: A talajfelszínen kialakuló minimum és maximum beton hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet különbség alakulása $h=5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ esetén az idő függvényében

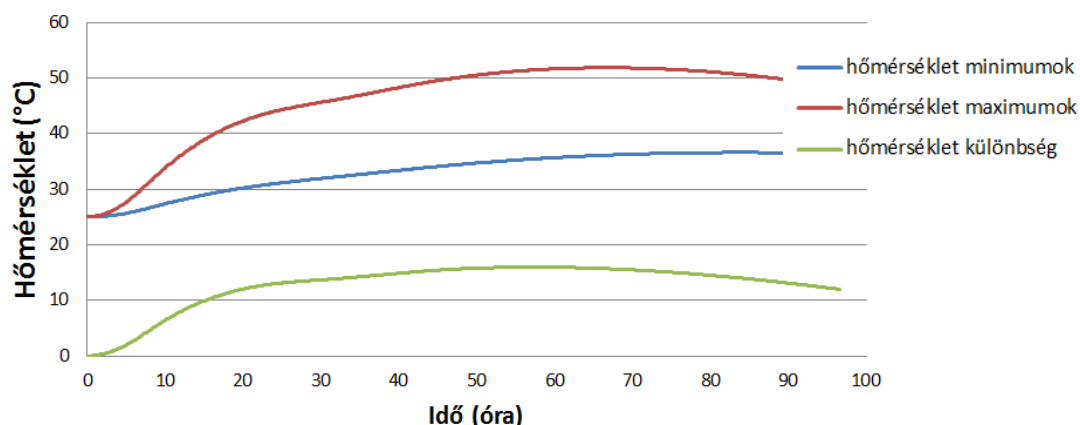
A fenti esetben egy maximális szigeteléssel ellátott betontest látható, így a hőmérsékletkülönbség $11,11^{\circ}\text{C}$ lett, amíg a 56. ábrán látható diagram szerint a hőszigetelés nélkül $13,97^{\circ}\text{C}$ alakul ki. A második esetben a ΔT érték már több mint 20 %-kal több, amely a magasabb hőmérsékletkülönbség esetén jelentős növekedést eredményezhet.



55. ábra: A talajfelszínen kialakuló minimum és maximum beton hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet különbség alakulása $h=30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ esetén az idő függvényében

A hőszigetelés nélküli esetben a hőmérsékleti minimumok a kezdeti hőmérséklethez képest alig emelkedtek, a hőmérsékletkülönbség alakulását a hőmérsékleti maximumok befolyásolták meghatározóan.

Az alábbi 56. ábrán a talajban kialakuló betonhőmérsékleteket mutatom be, ahol a hőmérsékleti maximumok esetén a görbe iránytangense meredekebb, a hőmérsékleti minimumoké viszont alacsonyabb.



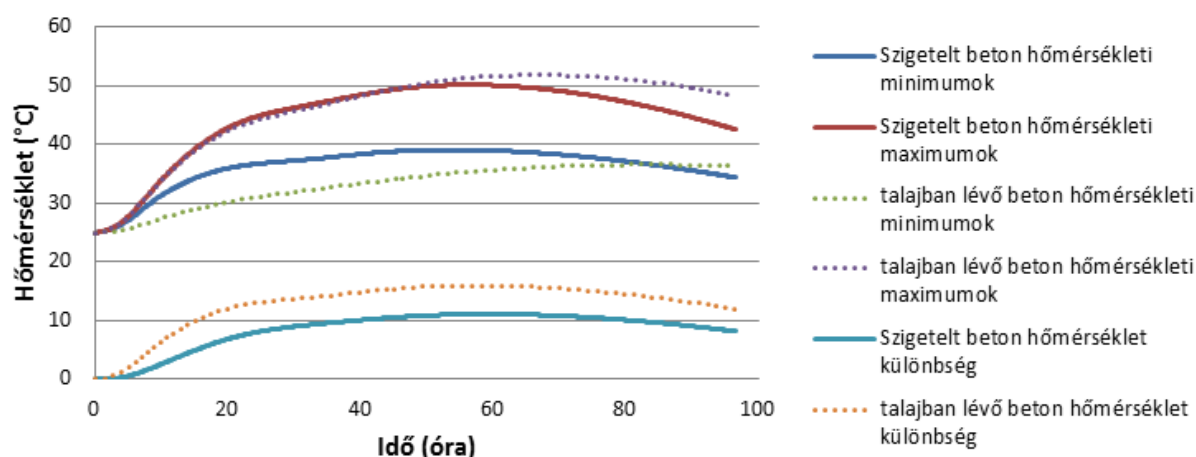
56. ábra: A talajban kialakuló minimum és maximum beton hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet különbség alakulása az idő függvényében

Az eredményeket a 17. táblázatban foglaltam össze.

Betonozás módja		Hőmérséklet (°C) / Időpont (h)		
		T_{min}	T_{max}	ΔT
Talajfelszínen	$h=5 \text{ W/m}^2\text{K}$	$T=39,08 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=50,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=11,11 \text{ }^{\circ}\text{C}$
		$t=53,73 \text{ h}$	$t=56,23 \text{ h}$	$t=59,23 \text{ h}$
	$h=30 \text{ W/m}^2\text{K}$	$T=27,26 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=41,02 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=13,97 \text{ }^{\circ}\text{C}$
		$t=16,40 \text{ h}$	$t=24,23 \text{ h}$	$t=25,23 \text{ h}$
Talajban		$T=36,60 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=51,83 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=15,98 \text{ }^{\circ}\text{C}$
		$t=83,57 \text{ h}$	$t=66,70 \text{ h}$	$t=57,06 \text{ h}$

17. táblázat: A vizsgálat eredményeit összefoglaló táblázat

A 57. ábrán látható diagram a fenti eredményeket szemlélteti.

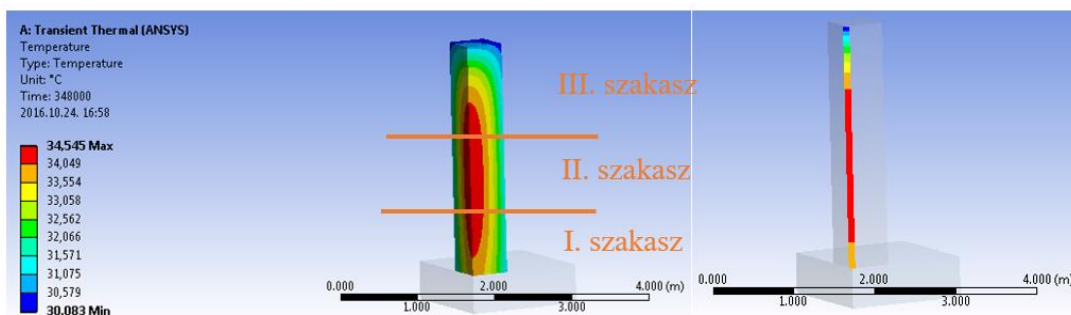


57. ábra: A talajban és talajfelszínen kialakuló minimum és maximum beton hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet különbség alakulása az idő függvényében

A talajfelszíni betonozás esetén a hőszigeteléssel ($h=5 \text{ W/m}^2\text{K}$) ellátott betontest hőtani viselkedése hasonló a talajban elhelyezett betonhoz. A két hőmérsékleti görbe lefutása hasonló, ahol a hőmérsékleti maximumok és minimumok közel azonos értéket mutatnak. Az időeltolódás a hőmérséklet különbségek esetén is kialakul, a talajfelszínen 59,23 órában, addig a talajban, 2 órával korábban 57,06 óránál éri el a maximumát.

3.6 A talaj és a levegő hatása a betonra

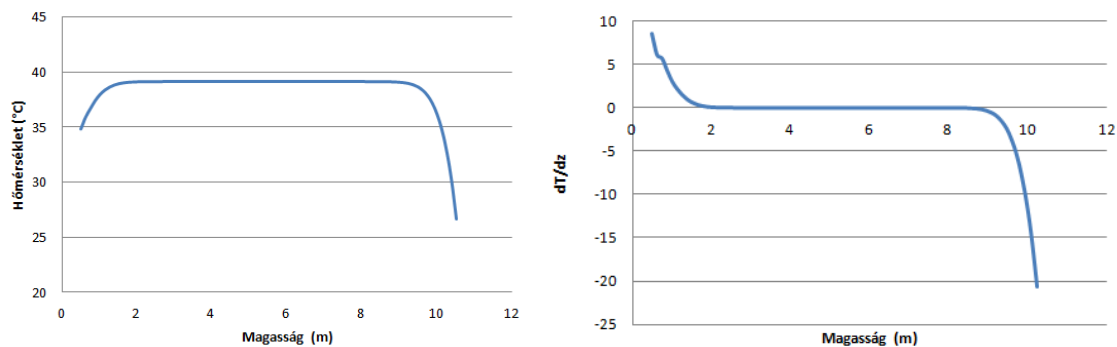
A 2.6 fejezetben bemutatott vizsgálat eredményei. Az analízis a 3 és a 10 méter magas modell esetén is közel azonos eredményt hozott. Első lépésben azt az időpillanatot kerestem meg, amikor a betontestnél a maximális hőmérséklet különbség kialakul. Ezután az ebben az időpillanatban a modell belsejében a függőleges tengelyen számolt hőmérsékletváltozásokat vizsgáltam (58. ábra). Az analízis eredményei az 3.5 táblázatban kerültek összefoglalásra, melyből jól látható, hogy a betontest magassága 3 szakaszra bontható hőtani viselkedését tekintve. Az első szakasz a talaj és a betontest, a harmadik szakasz a betontest és a környezeti levegő / szabadon álló betonfelület kapcsolatát jellemzi. Ezen két szakaszon a hőmérsékletváltozás más sebességgel zajlik le, attól függően, hogy milyen a betonnal érintkező közeg konvektív hőtranszport együttható ill. a környezeti hőmérséklet.



ahol: I. szakasz: talaj – beton, II. szakasz: beton, III. szakasz: beton – levegő kapcsolatát mutatja be

58. ábra: A hőmérséklet eloszlás a 3 méter magas modellen

Az egyes határokat a méterenkénti 1°C -kal történő hőmérsékletváltozás segítségével határoztam meg.



59. ábra: A hőmérséklet alakulása $h=5$ ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), $T=5^{\circ}\text{C}$ a 10 méter magas modellben

A modellekben található $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ hőmérséklet változási sebességtől kisebb változású sebességű rész magasságára jellemző, hogy itt a talajjal, illetve hasáb tetejének a levegővel való érintkezése nem befolyásolja jelentősen a hőmérséklet eloszlást (59. ábra). A vizsgálat során azokat az eseteket számoltam, ahol a téli és nyári betonozásra vonatkozó szélsőséges környezeti hőmérsékleteket, illetve a hőszigeteléssel ellátott és hőszigetelés nélküli betontestet vettem alapul. A 18. táblázatban a 3 és a 10 méter magas modellek eredményei kerültek összefoglalásra.

	3 méter magas modell				10 méter magas modell			
	Talajtól való távolság (m)	A modell tetejétől való távolság (m)	Modell min. magassága (m)	Max. hőmérséklet különbség időpontja (h)	Talajtól való távolság (m)	A modell tetejétől való távolság (m)	Modell min. magassága (m)	Max. hőmérséklet különbség időpontja (h)
$h=5$ ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) és $t=5$ ($^{\circ}\text{C}$)	0,9	1,2	2,1	46,1	0,9	1,3	2,2	46,9
$h=5$ ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) és $t=30$ ($^{\circ}\text{C}$)	1,0	1,0	2,0	58,3	1,0	1,0	2,0	59,2
$h=30$ ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) és $t=5$ ($^{\circ}\text{C}$)	0,3	1,0	1,3	15,6	0,4	0,9	1,3	15,4
$h=30$ ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) és $t=30$ ($^{\circ}\text{C}$)	1,1	0,8	1,9	27,4	0,6	0,8	1,4	28,0

18. táblázat: A 3 illetve 10 méter magas modellek eredményei

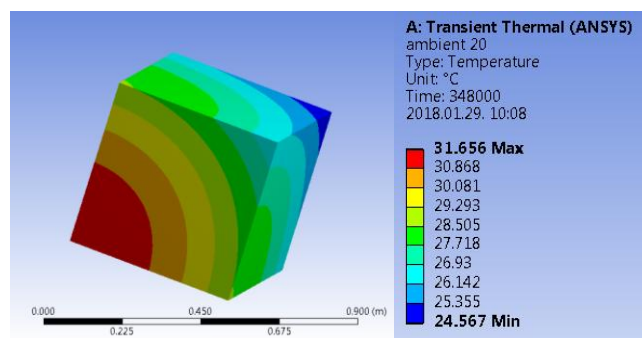
A végeelem modell általános, minimális térfogatú geometriája meghatározható, adott kezdeti és peremfeltételek mellett. Általánosságban elmondható a modellről, hogy állandó hőmérséklet (T) és növekvő konvektív hőtranszport együttható (h) értékek mellett a magasság nő, illetve állandó hővezetési tényező (h) és növekvő hőmérséklet (T) mellett a magasság csökken a geometria felső szakaszát illetően. Ezzel ellentétben állandó hőmérséklet (T) és növekvő konvektív hőtranszport együttható (h) értékek mellett a

magasság csökken, illetve állandó hővezetési tényező (h) és növekvő hőmérséklet (T) mellett a magasság nő a talajjal érintkező szakaszán a modellnek.

Az eredmények alapján belátható, hogy a modell magassági koordinátáihoz tartozó, adott hosszúságú szakaszon a hőmérsékletváltozás sebessége közel konstans, így a modellből - valamint ezek alapján a technológiai próbákból - hőtani szempontból elhagyható.

3.7 Változó környezeti hőmérséklet hatása a tömegbeton szerkezet hőmérsékleti mezőjére

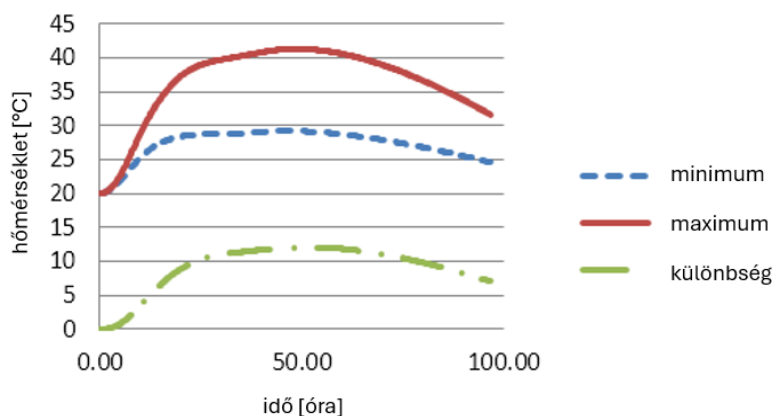
A 2. 7 fejezetben bemutatott vizsgálat vége-selemes analízissel kapott eredményét a 60. ábra szemlélteti, ahol látható, hogy a próbatest sarkainál alakult ki a hőmérsékleti minimum, a belsejében pedig a hőmérsékleti maximum.



60. ábra: A betontest hőmérsékleti eloszlása $T=20$ °C esetén

A vizsgálat eredményei mutatják, hogy az állandó és a változó környezeti hőmérséklet esetén eltérő beton próbatest minimális és maximális hőmérséklete.

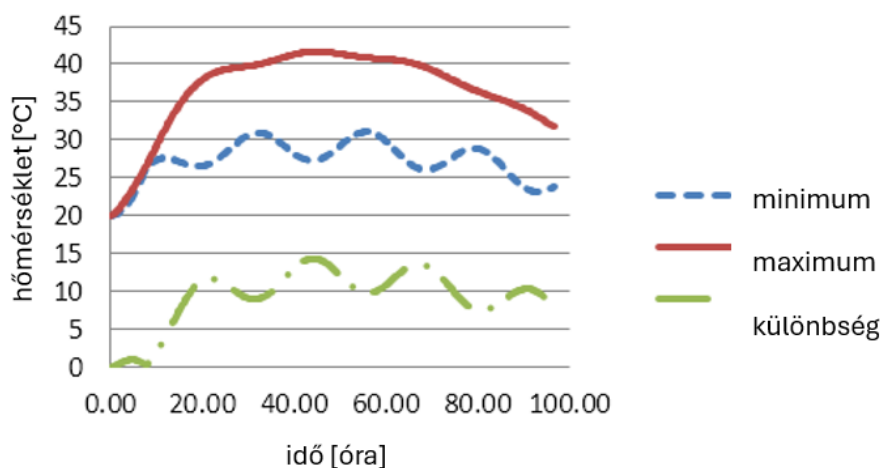
A 61. ábra az állandó környezeti hőmérsékletek alakulását mutatja, amely az alkalmazott cement hőtermelési görbéjével azonos lefutású.



61. ábra: A betonban kialakuló hőmérsékletek állandó környezeti hőmérséklet esetén

Ezek a hőmérsékleti minimumok és maximumok alacsonyabbak, mint a változó környezeti hőmérséklet esetén volt tapasztalható.

A 62. ábrán a változó környezeti hőmérséklet hatására kialakuló beton hőmérsékleteket látjuk. Erről megállapítható, hogy a periódikusan változó környezeti hőmérséklet esetén a hőmérséklet különbség nagyobb lett. Ez utóbbi esetben megfigyelhető, hogy a maximális hőmérséklet különbségeket jellemző $t_{\max}$ időkben eltolódás történik, az 51,2 és 44,07 óránál ez jól látható.



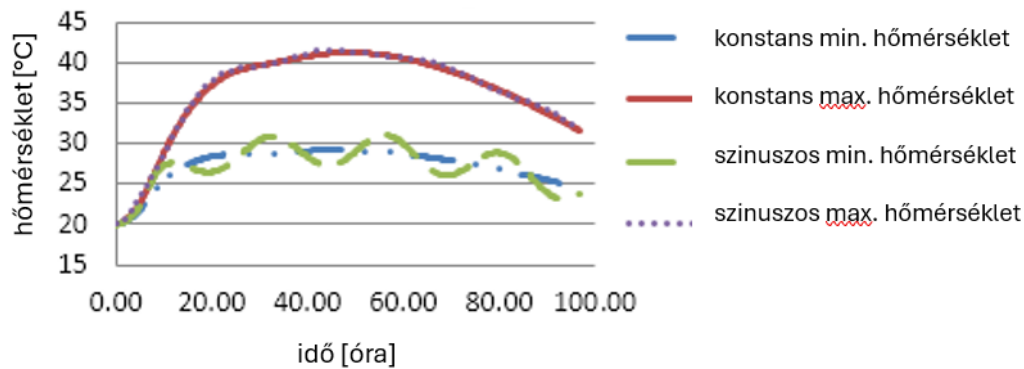
62. ábra: A betonban kialakuló hőmérsékletek változó környezeti hőmérséklet esetén
A kapott eredményeket a 19. táblázatban foglaltam össze.

	T_{min} [°C]	T_{max} [°C]	ΔT [°C]	t_{max} [h]
$T(t) = \text{const}$	29.24	41.30	12.11	51.2
$T(t) \neq \text{const}$	31.05	41.65	14.36	44.07

19. táblázat: a vizsgálat eredményei

A táblázatot tekintve látható, hogy a maximális ΔT hőmérséklet különbség állandó környezeti hőmérséklet esetén a 44. órában jelenik meg, amíg a változó környezeti hőmérséklet esetén ezt az 51,2 órában éri el.

Az eredményeket összegző 64. ábrán látható, hogy a változó környezeti hőmérséklet a hőmérsékleti maximumokra alig van hatással. A két görbe, azaz az állandó és változó környezeti hőmérsékleti maximumok közel azonosak.

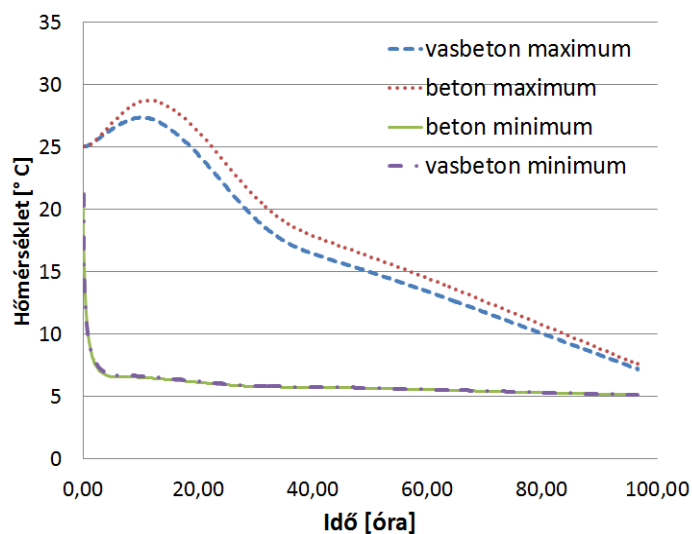


63. ábra A hőmérsékletkülönbségek alakulása állandó és változó környezeti hőmérsékletek esetén

A beton felszínén kialakuló hőmérsékleti minimumok esetén a változó környezeti hőmérséklet befolyásoló hatással van, ahogy a 63. ábrán ez látható.

3.8 A betonacél befolyásoló hatásának vizsgálata

A 2.8 fejezetben ismertetett vizsgálat eredményei. Az elemzés eredményeképpen megállapítható, hogy mindkét modellnél a hőmérséklet időbeni változása hasonló volt.



64. ábra: A minimum és maximum hőmérsékletek alakulása $h=30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, valamint $T=5^\circ\text{C}$ esetén az idő függvényében

A geometria középpontjában a legmagasabb, a sarkokban pedig a legalacsonyabb hőmérséklet alakult ki minden kísérleti beállításnál.

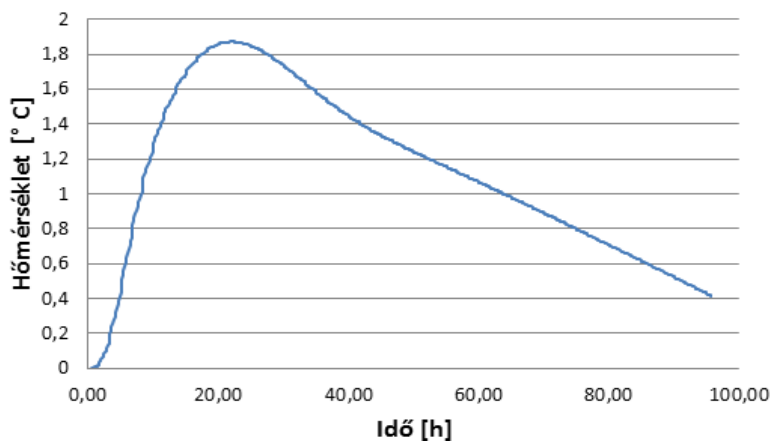
A kiemelt példáról (64. ábra) valamint a többi esetről is elmondható, hogy a ΔT hőmérsékletkülönbséget a hőmérsékleti maximumok befolyásolják számottevően, amíg a

hőmérsékleti minimumok hatása minimális. Továbbá a beton és a vasbeton modell eredményeinek összehasonlításakor jól látszik, hogy a hőmérsékleti minimumok esetében nincs befolyásoló hatása a betonacélok jelenlétének. A hőmérsékleti maximumok viszont a két modellnél (beton és vasbeton) eltérnek. A betonacélt is tartalmazó modell maximum hőmérsékletei alacsonyabbak, mint a beton modell esetén.

Peremfeltételek	Maximum hőmérsékletek különbsége [°C]	Idő [h]
$h=5 \text{ W/m}^2\text{K}$ és $T=5 \text{ °C}$	1,39	45,90
$h=5 \text{ W/m}^2\text{K}$ és $T=30 \text{ °C}$	1,08	60,89
$h=30 \text{ W/m}^2\text{K}$ és $T=5 \text{ °C}$	1,87	21,75
$h=30 \text{ W/m}^2\text{K}$ és $T=30 \text{ °C}$	1,09	38,56

20. táblázat: A maximum hőmérsékletek különbsége (vasbeton-beton) adott peremfeltételek mellett az idő függvényében

A vizsgálat eredményeit betonacéllal erősített és betonacél nélküli modellek esetén a 20. táblázatban foglaltam össze.



65. ábra: A hőmérséklet maximumok hőmérséklet különbségeinek alakulása

A kapott eredményekből kiderül, hogy a kísérletterben a $h=30 \text{ W/m}^2\text{K}$ és $T=5 \text{ °C}$ -nál a legnagyobb a modellezéskor kapott maximum hőmérsékletek különbsége, amely a 21,75. órában alakul ki. A 65. ábra a maximális hőmérsékletek különbségét szemlélteti az idő függvényében.

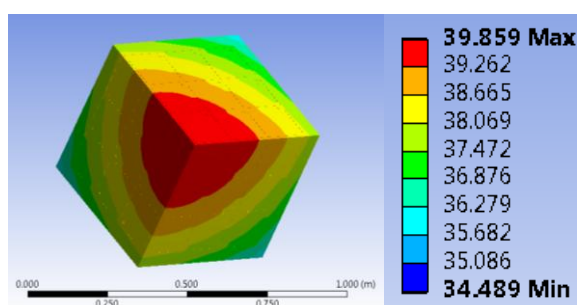
3.9 A betonacél befolyásoló hatásának elemzése eltérő mennyiségű betonacél esetén

A 2.9 fejezetben bemutatott vizsgálat eredményei. A vizsgálat eredményeit az eltérő mennyiségű betonacéllal elkészített modellek esetén a 21. táblázatban foglaltam össze.

Perem-feltételek	Betonacélok távolsága: 225 [mm]		Betonacélok távolsága: 145 [mm]	
	ΔT_{max} [°C]	Idő [h]	ΔT_{max} [°C]	Idő [h]
$h=5$ [W/m ² K] és $T=5$ [°C]	16,23	23,41	15,06	22,73
$h=5$ [W/m ² K] és $T=30$ [°C]	10,00	54,06	9,12	53,73
$h=30$ [W/m ² K] és $T=5$ [°C]	20,77	10,56	19,61	8,73
$h=30$ [W/m ² K] és $T=30$ [°C]	11,09	23,06	10,24	22,04

21. táblázat: A vizsgálat eredményei eltérő mennyiségű betonacélok esetén

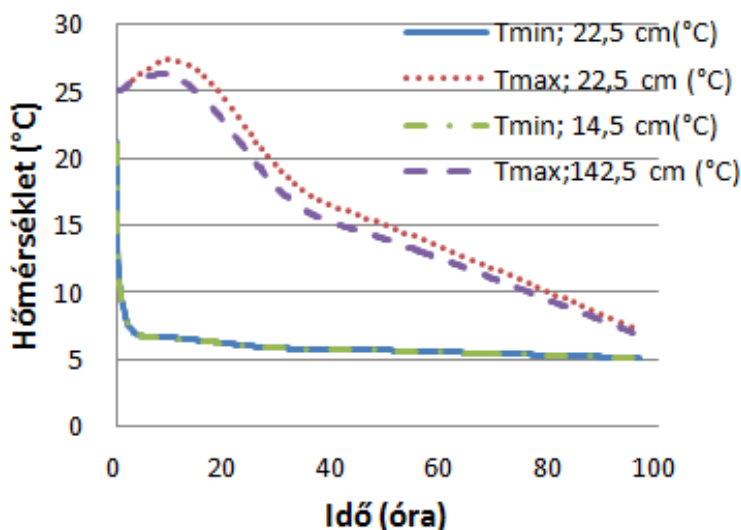
Az elemzés eredményeképpen elmondható, hogy mindkét modell esetében a minimum és maximum hőmérséklet időbeni változása hasonló volt. A vizsgált geometria középpontjában alakult ki a legmagasabb, a sarokpontokon pedig a legalacsonyabb hőmérséklet (66. ábra).



66. ábra: A vasbeton modell szimmetriasíkjában a hőmérséklet eloszlás $h=5$ W/(m²K), valamint $T=30$ °C esetén

A 67. ábrán látható diagram is jól szemlélteti, hogy a hőmérsékleti minimumok alig mutatnak eltérést a különböző mennyiségű betonacélok esetén. A hőmérsékleti

maximumok viszont jellemzően a 225 mm-es osztásközű betonacélok esetében magasabbak, mint a 145 mm-es osztásköz esetén.

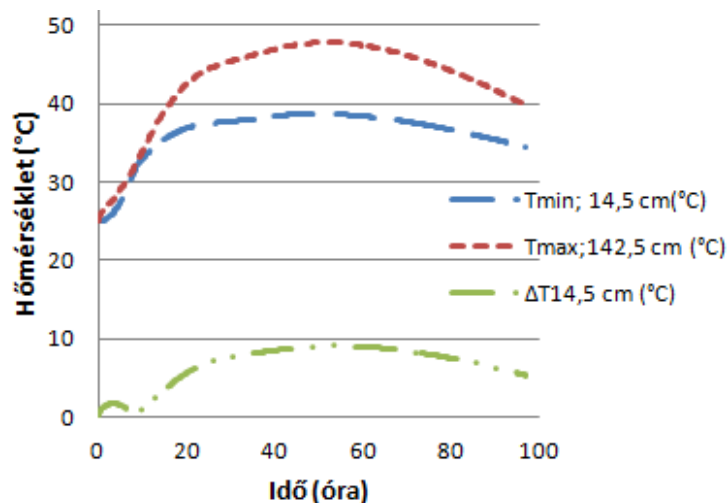


67. ábra: A minimum és maximum hőmérsékletek alakulása $h=30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, valamint $T=5^\circ\text{C}$ esetén az idő függvényében

Az 68. ábrán bemutatott és a többi, vizsgált esetben is elmondható, hogy a ΔT hőmérséklet különbség mértékét a betontestben kialakuló hőmérsékleti maximumok határozzák meg. Az elemzés során az is kiderült, hogy a két modell esetében a sűrűbb osztásközű betonacél alkalmazásakor a ΔT hőmérsékletkülönbség korábbi időpontban érte el maximumát, mint a ritkább vasalás esetén.

A téli betonozás esetén, ahol a környezeti hőmérséklet $T=5 \text{ }^\circ\text{C}$ már jelentősen befolyásolja a hőmérséklet különbségek alakulását a betonacélok mennyisége. A szigetelés alkalmazásakor, ahol $h=5 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ és $T=5 \text{ }^\circ\text{C}$ a sűrűbb osztásközű betonacél alkalmazása mellett a betonban kialakuló $36,77 \text{ }^\circ\text{C}$ -os maximális hőmérséklet a $21,67$. órában tapasztalható. A 15 .- 16 . órában fellépő maximális hőmérsékletkülönbség viszont így sem éri el a beton tönkremenetelét jelentő repedésveszélyt jelző $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -ot.

A legkisebb hőmérséklet különbség a $h=5 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ és $T=30 \text{ }^\circ\text{C}$ peremfeltételek esetén alakult ki (68. ábra), ami nyári betonozást szemléltetett, ahol a zsaluzatot hőszigetelő lemezekkel egészítették ki. Annak ellenére, hogy a hőmérsékleti maximum az $51,68$ órában a $47,81^\circ\text{C}$ -os hőmérsékletet is elérte a hőszigetelő lemezek hatására az elnyújtott hőtermelés következtében nem tudott kialakulni $10 \text{ }^\circ\text{C}$ -nál magasabb hőmérséklet különbség a beton-modellben.



68. ábra: A minimum és maximum hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet különbség alakulása $h=5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, valamint $T=30^\circ\text{C}$ esetén az idő függvényében

Ehhez hasonlóan a nyári betonozást reprezentáló $h=30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ és $T=30^\circ\text{C}$ peremfeltételek mellett, hőszigetelés nélküli zsaluzat esetében sem tudott kialakulni a repedésveszélyt előidéző hőmérséklet különbség, annak időbeni maximuma viszont a 22.-23. órában alakult ki, mindkét modell esetén.

Az elemzés eredményeképpen elmondható, hogy a repedés kialakulása a $h=30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ konvektív hőtranszport együtttható és $T=5^\circ\text{C}$ környezeti hőmérsékleti feltételek esetén a legvalószínűbb, amely a szerkezet károsodását okozhatja. A hőszigetelés nélkül hagyott zsaluzat a téli betonozáskor előidézhetheti a tönkremenetelt. A kialakult $20,77^\circ\text{C}$ -os hőmérséklet különbség a megengedett 20°C -os hőmérsékleti különbséget meghaladta a 10,56. órában. Viszont a 14,5 cm-es osztásközü vasalás esetén a ΔT hőmérséklet különbség $19,61^\circ\text{C}$ -ra csökkent a 8,73. órában.

4. ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

4.1 Kutatásom összegzése

A vizsgálataim során a tömegbeton szerkezetek készítésekor felmerülő problémákat tanulmányoztam, amely a cement kötési folyamata során kialakuló hőmérsékletre irányul. A nagy tömegű beton szerkezetek esetén a geometria belsejében és a felszínén kialakuló hőmérsékletek között különbség a szerkezet repedéséhez vezethet, amely a szerkezet tartósságát, ezáltal az állékonyságát veszélyezteti.

Munkám során egyedi kalorimétert terveztem és állítottam össze, amellyel az adott projekthez kapcsolódó cementhabarcs minta gyors és gazdaságos vizsgálata megvalósítható. A beton hőtermeléséhez készített kaloriméteren végrehajtottam egy digitális hőmérő kompenzálást, majd differenciálegyenlet segítségével megvizsgáltam a hőszigetelt habarcestartó hőtani tulajdonságait forróvizes mérés segítségével. A felállított modell megfelelőségét statisztikai módszerekkel ellenőriztem. A vizsgálat eredményeképpen kA szorzat segítségével sikerült összekapcsolnom a féladiabatikus modellt az elméleti, hőveszteség nélküli esettel, így a betonhabarcs hőmérsékletére vonatkozóan definiáltam egy monoton változó függvényt. A függvény segítségével a habarcs fizikai jellemzőinek ismeretében meghatároztam a CEM III minta 1 m^3 -re vonatkozó hőtermelését az idő függvényében.

A kalorimétert ezt követően a CEM I és CEM III típusú cementek vizsgálatára használtam és a mérési eredményeket a végeselemes analízishez bemeneti paraméterként alkalmazhatóvá vált.

A végeselemes analízis során különböző szituációkat vizsgáltam, ahol egyrészt az volt a cél, hogy a szimulációk során alkalmazandó minimális térfogatot definiáljam, másrészt a különböző betonozáskori kezdeti feltételekre – betontechnológiai szempontból releváns - vonatkozó hiátusokra választ adjak.

Az időjárási viszonyokat szimulálva – téli és nyári betonozás – valamint a hőszigeteléssel ellátott és hőszigetelés alkalmazása nélküli betonozást vizsgáltam. A végeselem modell eredményei alapján elmondható, hogy a vizsgált kísérletterben a minimális hőmérséklet görbét a külső hőmérséklet változásának sebessége az első 12 órában befolyásolja számottevő mértékben. A maximális hőmérséklet kialakulása a beton keverék korai szilárdulási szakasza után várható, időpontja függ a környezeti hőmérséklettől és a környezet által defininált konvektív hőtranszport együtthatótól. A környezeti hőmérséklet

növekedése a maximális hőmérséklet különbség időpontját késlelteti, míg a konvektív hőtranszport együtttható növekedése időben előrébb hozza.

A következő kutatási téma a talajfelszín alatti szerkezet kialakítására vonatkozott. Megállapítottam, hogy a talajban való betonozáskor a hőmérséklet különbség maximuma korábban éri el a maximumot, mint a talajfelszíni esetében, így azt a szakaszos betonozáskor figyelembe kell venni. A szimulációban figyelembe vett kezdeti és peremfeltételek között a talajban való betonozáskor repedésveszély nagy valószínűséggel nem alakul ki a betonozás korai kötési szakaszában.

A korábbiakban már kialakított vizsgálati mátrixot alkalmazva a talaj és a levegő hőelvonó hatásait vizsgáltam. A betonmodell ennek érdekében két szignifikánsan eltérő magasságú, 3 ill. 10 méteres méretűek lettek. A vizsgálat eredménye képpen a minimálisan vizsgálni érdemes betontérfogat került megállapításra.

A fentiekben állandó betonozáskori környezeti hőmérsékletet feltételeztem a vizsgálataim során. A kutatásom azonban kiterjedt a változó környezeti hőmérséklet szimulációjára is. Ennek gyakorlati oka a napi változó hőmérséklet – napközben és éjszaka – amely gyakran befolyásolhatja a betonozás tervezett kezdeti időpontját, főként a nyári betonozások tervezésekor. Az egyszerűsített modellt alkalmazott kutatásom során keletkezett eredmény rámutatott, hogy a betonozás kezdő időpontjának megválasztása és az aktuális időjárási viszonyok figyelembevétele megoldást kínálhat egy-egy kritikus projekt esetén, ezzel is csökkentve a szerkezet repedésveszélyét.

A kutatásom másik nagyobb területe a szerkezetépítésben is gyakran alkalmazott szerkezet, a vasbeton vizsgálata. Első ízben a vasalás nélküli és a vasalással ellátott modellek hőmérsékleteinek alakulását vizsgáltam. Megállapítottam, hogy a vasalással ellátott és a vasalás nélküli modell esetében a minimum hőmérsékletek közötti különbség az adott kísérlettérben elhanyagolható. Ezzel ellentétben a betonacélok hatása a betonszerkezetben kialakuló hőmérsékleti maximumokra jelentős hatással van.

Fenti eredmények figyelembevétele mellett az adott betontérfogatban eltérő mennyiségű betonacélok hatását vizsgáltam. Megállapítottam, hogy az alkalmazott kezdeti és peremfeltételek esetében hőtani szempontból mutatott eltérést a különböző mennyiségű betonacélok elhelyezése a szerkezetben. Egyértelműen igazolást nyert, hogy a nagyobb mennyiségű betonacél használata a környezeti hőmérséklettől és a konvektív hőtranszport együttthatótól függetlenül minden esetben csökkentette a szerkezetben kialakuló maximális

hőmérséklet különbséget. Ennek okán már előre jelezhető a betonacél mennyiségének ismeretében a repedéskockázat.

4.2 Új tudományos eredmények

T1: Hőtani kompenzációs modellt készítettem, melynek segítségével féladiabatikus rendszerben mért hőmérsékleti értékeket adiabatikus rendszert leíró hőmérsékletté alakítottam át. A modell segítségével meghatároztam adott CEM I és CEM III típusú cementek hőtermelő képességét a környezettel hőközlés mentes vizsgálati térben. A kompenzált hőmérsékletet leíró egyenlet az adiabatikus szempontból zárt környezet vonatkozásában a következő:

$$T_{kompenzált}(t = i) = T_{mért}(t = i) + \sum_{t=1}^{t=i-1} T_{veszteség}(t)$$

T2: A kis hőfejlesztésű CEM III B 32,5 N jelű cementből készített betonkeveréket adott kísérletterben (ahol a konvektív hőtranszport együttható 5 W/(m²K) és 30 W/(m²K) között, a környezeti hőmérséklet pedig 5 °C és 30 °C között változhat) megvizsgáltam és megállapítottam, hogy a tömegbeton kötések kialakuló maximális hőmérséklet függését a környezeti hőmérséklettől első fokú, a konvektív hőtranszport együtthatótól pedig másodfokú polinommal lehet leírni:

$$\Delta T = a + bT + ch + dh^2$$

A maximális hőmérséklet kialakulásának időpontja függ a környezeti hőmérséklettől és a környezet által definiált konvektív hőtranszport együtthatótól. A környezeti hőmérséklet növekedése késlelteti, míg a konvektív hőtranszport együttható növekedése időben előrébb hozza a maximális hőmérsékletkülönbség időpontját.

T3: Szimuláció segítségével megállapítottam, hogy az 1 m x 1 m alapterületű, 3 méter illetve 10 méter magasságú betontestek esetén a 1,5 m x 1,5 m x 0,5 m térfogatú talaj felé történő hőáramlás befolyásolja hőmérsékleti maximumok kialakulását. A kis hőfejlesztésű CEM III B 32,5 N jelű cementből készített betonkeveréket adott kísérletterben (ahol a konvektív hőtranszport együttható 5 W/(m²K) és 30 W/(m²K) között, a környezeti hőmérséklet pedig 5 °C és 30 °C között változhat és a beton bedolgozási hőmérsékletét 25 °C –on állandónak

tekintettem) vizsgáltam. Az eredményekből megfogalmaztam, hogy a beton próbatest viselkedése hőtani szempontból 3 szakaszra bontható: I. szakasz, melyre hatással van a talaj hőelvonó képessége az alsó határfelületén és a környezeti levegővel az oldalsó határfelületen érintkezik, II. szakasz, mely a környezeti hőmérsékletű levegővel csak az oldalsó határfelületeken érintkezik, III. szakasz, mely az oldalsó és a felső határfelületeken érintkezik a környezeti hőmérsékletű levegővel. Megállapítottam, hogy a vizsgált rendszerben az I. betonrész határozza meg a teljes szerkezet maximális hőmérsékletkülönbség értékét.

T4: Szimuláció segítségével bizonyítottam CEM III B 32,5 N jelű cementből készített betonkeverék alkalmazása esetén, hogy a repedésveszély hőtani jellemzése szempontjából a vasbeton szerkezetek előnyösebbek, mint a betonacélt nem tartalmazók. Az alkalmazott kísérletterben (ahol a konvektív hőtranszport együttható $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ és $30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ között, a környezeti hőmérséklet pedig 5°C és 30°C között változhat és a beton bedolgozási hőmérsékletét 25°C –on állandónak tekintettem) végzett vizsgálatok eredményei alapján megállapítottam, hogy a környezeti hőmérséklettől és a konvektív hőtranszport együtthatótól függetlenül a vizsgált betonacél kiosztások (0,65 ‰ és 1,35 ‰) csökkentik az adott időpillanatban kialakuló hőmérsékletkülönbséget a betonacélt nem tartalmazó tömegbetonokhoz képest. A defininált kísérletterben találtam olyan vizsgálati pontot, ahol $h=30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ és $T=5^\circ\text{C}$ peremfeltételek mellett a 0,65 ‰ mennyiségű betonacél alkalmazásakor 6 %-kal magasabb hőmérsékletkülönbség ($20,7^\circ\text{C}$) alakul ki, mint az 1,35 ‰ mennyiségű betonacél esetén, ezért betonacél használatakor is szükséges a külső hőmérséklettől függő hőszigetelés tervezése.

T5: Szimuláció segítségével meghatároztam a minimálisan szükséges próbatest magasságot egy $1\text{m} \times 1\text{m}$ alapterületű betontestre vonatkoztatva, amelynél a talaj és a levegő által okozott hőáramlás egymástól függetlenül jellemezhető. A végeselemes modell (ahol egy CEM III B 32,5 N jelű cementből készített betonkeveréket vizsgáltam és a konvektív hőtranszport együttható $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ és $30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ között, a környezeti hőmérséklet pedig 5°C és 30°C között változhat, valamint a beton bedolgozási hőmérsékletét 25°C –on állandónak tekintettem) segítségével a minimális geometriai magasságot 1,3 méter és 2,2 méter közöttinek állapítottam meg a hőszigetelés és a környezeti hőmérséklet függvényében.

T6: Szimuláció segítségével megállapítottam, hogy 1m x 1m x 1m térfogatú, CEM III B 32,5 N jelű cementből készített betonkeverék alkalmazása esetén (ahol a környezeti átlag hőmérséklet 20 °C, a hőmérséklet változás +/- 5°C, a frissbeton bedolgozási hőmérséklete 20 °C volt, és a konvektív hőtranszport együttható 5W/(m²K) a változó környezeti hőmérséklet a betontestben és annak felszínén kialakuló hőmérsékletekre is befolyásoló hatással van. Időben változó környezeti hőmérséklet esetén bizonyítottam, hogy a kialakult maximális hőmérsékletkülönbség időpontja a változó környezeti hőmérséklet minimum értékéhez tartozik.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Bálint Julianna: Építőanyagok I, SZIE-YMÉK, Építőanyag és Minőségirányítás Tanszék, jegyzet, 2005, ISBN 978-963-7169-29-8
- [2] Zement-Taschenbuch, Verein Deutscher Zementwerke e.V. 51. Ausgabe. Verlag Bau+Technik GmbH., Dusseldorf, 2008., 5.4.1. fejezet, pp. 329-332
- [3] Dr. Kausay Tibor, Fiatal beton szilárdulási folyamata 1. rész, Beton, 2010/12 pp 6-8
- [4] Dr. Balázs György: Különleges Betonok és betontechnológiák I., Akadémiai Kiadó, Budapest, 2007, ISBN 978-963-05-8465-4
- [5]. <https://betonnet.hu/gozolhetoseg/> (letöltve: 2022.08.03)
- [6] <https://edu.epito.bme.hu/local/coursepublicity/mod/resource/view.php?id=71990> (letöltve: 2022.08.03)
- [7] (https://docplayer.hu/10302084-Kulonleges-betonok-es-betontechnologiak.html (letöltve: 2022.08.03)
- [8] <https://www.betonopus.hu/notesz/szaz-ev-tervezesi-elettartam.pdf> (letöltve: 2022.08.03)
- [9] 4798-1:2004 Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelés, valamint az MSZ EN 206-1 alkalmazási feltételei Magyarországon
- [10] Farkas György - Huszár Zsolt - Kovács Tamás - Szalai Kálmán : Betonszerkezetek méretezése az Eurocode alapján, Terc Kft, 2006, ISBN 963 9535 46 X, pp 18
- [11] Szathmari Eszter: Betonszerkezetek használati élettartam alapú tervezésének tartóssági szempontja, TDK dolgozat, 2012, pp 4
- [12] Dr. Balázs György - Dr. Balázs L. György: Betonszerkezetek tartóssága, Műegyetem Kiadó, Budapest, 2008, ISBN:978-963-420-954-6
- [13] Balázs Gy. - Kovács K. (1990): A beton karbonátosodása, Építőanyag, 1990/5. pp 47-51
- [14] Dr. Balázs György: Különleges Betonok és betontechnológiák III., Akadémiai Kiadó, Budapest, 2010, ISBN 978-963-05-8920-8
- [15] Dr. Balázs L. György, Dr. Borosnyói Adorján, Dr. Kausay Tibor, Rd. Kopecskó Katalin, Dr. Lublós Éva, Építőanyagok - MSc, Oktatási segédlet, BME, Építőmérnöki Kar, Építőanyagok és Magasépítési Tanszék, 2015, p 154
- [16] ACI Committee 116: „Cement and Concrete terminology (AC116R-00),” 2000 (Reapproved 2005), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 73pp.

- [17] Dr. Salem Georges Nehme: Tömegbetonok pdf., Budapest 2018., p6
<https://edu.epito.bme.hu/local/coursepublicity/mod/resource/view.php?id=71989>
(letöltve:2022.08.03.)
- [18] B. Klemczak: Engineering Structures: Reinforced concrete tank walls and bridge abutments: Early-age behaviour, analytic approaches and numerical models 84 (2015) pp 233-251
- [19] B. A. Klemczak: Modeling thermal-shrinkage stresses in early age massive concrete structures – Comparative study of basic models, Archives of civil and mechanical engineering 14 (2014) pp 721-733
- [20] EUROCODE 2 beton és vasbetonszerkezetek tervezése, Kézirat Budapest (BME Vasbetonszerkezetek Tanszéke)
- [21] Zhou Yunchuan, Bai Liang ,Yang Shengyuan, Chen Guting: Simulation Analysis of Mass Concrete Temperature Field:, Procedia Earth and Planetary Science 5 (2012) pp 5 – 12
- [22] Török Zsuzsanna: Duna-Projekt 01.11 védelmi szakaszán a Győr-Likócsi töltésfejlesztés és Iparcsatorna torkolati árvízkapu építési munkáinak a FIDIC Sárga könyv szerinti megvalósítása és a kivitelezési tervek elkészítése a 191/2009. (IX.15.) Korm. rendeletnek megfelelő tartalommal, Betontechnológiai utasítás, 2013
- [23] B. Klemczak, A. Knoppik-Wróbel: Early age thermal and shrinkage cracks in concrete structures - description of the problem, Architecture civil engineering environment, 2011/2, pp 35 – 47
- [24] Dr. Kausay Tibor: Betonos e Könyv I. kötet, Budapest, 2020. június, ISBN 978-615-00-6699-8, magánkiadás pp 457-473
- [25] https://epuletdiagnosztika.net/cms/wp-content/uploads/2020/12/betontechnologia_01_alkotoanyagok_es_betontervezes.pdf
(Letöltve: 2023. 09.22.)
- [26] H. Kagimoto, M. Kawamura: Measurements of strain and humidity within massive concrete cylinders related to the formation of ASR surface cracks, Cement and Concrete Research 41, 2011, pp 808-816
- [27] Túlio Honorio, Benoit Bary, Farid Benboudjema: Evaluation of the contribution of boundary and initial conditions in the chemo-thermal analysis of a massive concrete structure, Engineering Structures 80 (2014), pp 173-188
- [28] Lerch, W.: Effect of SO3 Content of Cement on Durability of Concrete. PCA Research and Developement (1945) 0285, pp 9

- [29] A. M. R. P. Bopegedera and K. Nishanthi R. Perera,: “Greening” a Familiar General Chemistry Experiment: Coffee Cup Calorimetry to Determine the Enthalpy of Neutralization of an Acid– Base Reaction and the Specific Heat Capacity of Metals, *Journal of Chemical Education*, 2016, pp. A-F
- [30] Jochen Stark, Katrin Bollman: Delayed Ettringite Formation in Concrete, *Nordic Concrete Research*, 2000
- [31] Lu H.R., Swaddiwudhipong, S and Wee, T.H. (2001), “Evaluation of Thermal Crack by a Probabilistic Model Using the Tensile Strain Capacity,” *Magazine of Concrete Research*, Vol. 53, No.1, pp. 25-30.
- [32] Balázs Gy. - Fehér J. - Szombathy Z. - Tóth A. - Zsigovics I. (1982): A Paksi Atomerőmű betonfalai hőtechnikai vizsgálata a betonozást követő időszakban. *Építőanyagok Tanszék Tudományos Közl. 31. kötet.*
- [33] Ju-Hyung Ha, Youn su Jung, Yun-gu Cho: Thermal crack control in mass concrete structure using an automated curing system: *Automation in Construction* 45 (2014) 16–24
- [34] G. De Schutter, M. Vuylsteke: Minimisation of early age thermal cracking in a J-shaped non-reinforced massive concrete quay wall, *Engineering Structures* 26 (2004) pp. 801–808
- [35] Feng Lin, Xiaobin Song, Xianglin Gu, Bin Peng, Lianping Yang: Cracking analysis of massive concrete walls with cracking control techniques, *Construction and Building Materials* 31 (2012) pp 12–21
- [36] Blanks, R. F. (1933): „Comparison of selected portland cement in mass concrete tests”, *Journal of the American Concrete Institute*
- [37] Swamy Vandanapu, K. Muthumani: Heat of Hydration and Alkali- Silicate Reaction in Oil Palm Shell Structural Lightweight Concrete, *Silicon* 12, 2020, pp.1043-1049
- [38] Radcliff, S.R., Navidi, M. H.: *Chemistry*, 2nd edn., West: St. Paul, MN, 1994
- [39] Hill, J.W., Petrucci, R. H.: *General Chemistry: An Integrated Approach*, 2nd edn., Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, 1999
- [40] Moore, J.W., Stanitski, C. L., Jurs, P. C.: *Principles of Chemistry: The Molecular Science*, Brooks/Cole: Belmont, CA, 2010
- [41] MSZ EN 196-1:2010 Magyar Szabványügyi Testület: Cementvizsgálási módszerek- Hidratációs hő. Féladiabatikus módszer. 2010 október.
- [42] Yunus Ballim: A numerical model and associated calorimeter for predicting temperature profiles in mass concrete, *Cement and Concrete Composites* 26(6),2004, pp. 695-703

- [43] G. Gibbon, Y. Ballim, and G. Grieve, "A Low-Cost, Computer-Controlled Adiabatic Calorimeter for Determining the Heat of Hydration of Concrete," *Journal of Testing and Evaluation* 25(2), 1997, pp. 261-266. <https://doi.org/10.1520/JTE11488J>
- [44] R. Springenschmid: *Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*, CRC Press, 1998. pp. 364
- [45] Gibbon GJ, Ballim Y.: Laboratory test procedures to predict the thermal behaviour of concrete. *J South African Inst Civil Engineers*, 1996, 38(3): 21–4 (3rd Quarter).
- [46] John C. O’C. Young: Coffee Cup Calorimeter Heat Loss Correction, *Chem. Educator* 2016, 21, 53–62
- [47] Pt100 Ellenállás-hőmérős (RTD) Érzékelés <https://www.tckft.hu/rtd-pt100-reference/rtd-pt100-data.html#rtd-theory> (Letöltve:2022.08.03.)
- [48] Chih-Yuan Chang, San-Shan Hung: Implementing RFIC and sensor technology to measure temperature and humidity inside concrete structures: *Construction and Building Materials* 26 (2012) pp. 628-637
- [49] Hőelemek fajtái és felhasználásuk, <https://www.muszeroldal.hu/assistance/hoelemekfajtai.html> (Letöltve: 2022.08.03.)
- [50] Az SHT21, SHT25 és STS21 érzékelők, <http://www.soselectronic.hu/?str=978&article=sensirion-az-sht21-sht25-es-sts21-erzekelok-csak-3x3mm-t-foglalnak-el-a-nyak-on> (letöltve: 2022.08.03)
- [51] Norberto Barroca , Luís M. Borges, Fernando J. Velez, Filipe Monteiro, Marcin Górski, João Castro-Gomes: Wireless sensor networks for temperature and humidity monitoring within concrete structures:, *Construction and Building Materials* 40 (2013) pp. 1156–1166
- [52] Ashley Norris, Mohamed Saafi, Peter Romine: Temperature and moisture monitoring in concrete structures using embedded nanotechnology/microelectromechanical systems (MEMS) sensors: *Construction and Building Materials* 22 (2008) pp. 111–120
- [53] Bagi Katalin: *A diszkrét elemek módszere*, BME Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék, Budapest, 2007, ISBN 978-963-420-929-4
- [54] Chang-keun Lim, Jin-Keun Kim, Tae-Seok Seo: Prediction of concrete adiabatic temperature rise characteristic by semi-adiabatic temperature rise test and FEM analysis, *Construction of Building Materials*, Vol. 125, 2016, pp. 679-689
- [55] Xiaobin Song, Yeqi Li, Chao Chen, Feng Lin, Susu Shang: Modeling early age RC slab cracking considering time-dependent bond behaviour, *Engineering Structures* 138 (2017) pp. 27–34

- [56] Domonyi Erzsébet, Prof. Dr. Csizmadia Béla, Prof. Dr. Telekes Gábor: Hőmérséklet különbség változása beton és vasbeton szerkezetek kötési folyamata során, Műszaki tudományos közlemények 7: pp. 131-134. (2017)
- [57] Azenha M, Faria R, Ferreira D. Identification of early-age concrete temperatures and strains: monitoring and numerical simulation. Cement & Concrete Comp 2009; 31(6):369-378.
- [58] Bennet Kuriakose, B. Nageswara Rao, G. R. Dodagoudar :Early-age Temperature Distribution in a Massive Concrete Foundation, Global Colloquium in Recent Advancement and Effectual Researches in Engineering, Science and Technology (RAEREST 2016), Procedia Technology 25 (2016) 107 – 114
- [59] Qingbin Li, Junfeng Guan, Zhimin Wu, Wei Dong, Shaowu Zhou, 2016 Equivalent maturity for ambient temperature effect on fracture parameters of site-casting dam concrete, Construction and Building Materials 120 pp 293-308
- [60] D. A. Hordijk, H. W. Reinhardt, 1990 Fracture of concrete in uniaxial tensile experiments as influenced by curing conditions, Engineering Fracture Mechanics, 35 pp 819-826
- [61] J. K. Kim, Y. Lee, S. T. Yi, 2004 Fracture characteristics of concrete at early ages, 2004 Cement and Concrete Research, 34 pp 507-519
- [62] Domonyi, Erzsébet ; Dr. Barányi, István ; Dr. Réger, Mihály Antal, Egyedi féladiabatikus kaloriméter fejlesztése, Gép 72 : 3-4 pp. 13-16. , 4 p. (2021)
- [63] Osama Kh. Nusier: The Effect of Moisture and Density on Thermal Properties of Some Soils, Sylwan 2015, online ISSN: (0039-7660 https://www.researchgate.net/publication/320729070_The_Effect_of_Moisture_and_Density_on_Thermal_Properties_of_Some_Soils)
- [64] Domonyi, Erzsébet ; Dr. Barányi, István ; Dr. Réger, Mihály Antal, Egyedi fejlesztésű kaloriméter hőtani jellemzőinek meghatározása, GÉP 72 : 3-4 pp. 17-20. , 4 p. (2021)
- [65] Domonyi Erzsébet, Prof. Dr. M. Csizmadia Béla, Prof. Dr. habil Telekes Gábor, Tömegbetonok repedési hajlamának elemzése a hőmérséklet és a hőátadási tényező függvényében, GÉP LXVII (5-6), pp 44-47, (2016)
- [66] Domonyi Erzsébet, Prof. Dr. M. Csizmadia Béla, Prof. Dr. habil Telekes Gábor, Vasbeton műtárgyak kötés közbeni hőmérséklet különbsége eltérő betonacél mennyiségek esetén, GÉP LXVIII. (3), pp 40-43, (2017)
- [67] Erzsébet Domonyi, István Barányi, Engineering Symposium at Bánki, CEM I and CEM III typed cement heat generation and impact on the crack risk, <https://esb.bgk.uni->

obuda.hu/wp-content/uploads/2024/09/ESB2021.pdf 47-50 pp. (2021), (Letöltve: 2024. 11.28.)

[68] Erzsébet Domonyi, István Barányi, Engineering Symposium at Bánki, Finite element analysis of early age concrete crack risk probability in different types of box-shaped samples <https://esb.bgk.uni-obuda.hu/wp-content/uploads/2024/09/ESB2021.pdf> 43-46 pp. (2021), (Letöltve: 2024. 11.28.)

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

ACI	American Concrete Institute
ASR	Alkali-silica reactivity
DEF	Másodlagos (vagy késleltetett) ettringit képződés
DEM	Discrete thermal Element Modelling - Diszkrétéleemes módszer
FDOT	Florida Department of Transportation
VEM	Végeselemes – módszer
TRM	Tikhonov Regularization Method
PPC	PCC rendszer: polimerdiszperzióval módosított cement kötésű védőanyag

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: A betonok legfontosabb jellemzői [1] alapján saját kiegészítésekkel
2. táblázat: Különleges betonok csoportosítása [4] általam bővített
3. táblázat: Tervezési élettartamok [10]
4. táblázat: A tömegbetonokban kialakuló repedések kiváltó okai
5. táblázat: A termoeleemes hőmérők típusai [49]
6. táblázat: A habarcs keverék EN 196-1 szabvány szerint
7. táblázat: Alapanyagok arányos átszámítása
8. táblázat: Alapanyagok térfogata
9. táblázat: Hőelemek tulajdonságai
10. táblázat: A betonszerkezet méretei
11. táblázat: A vizsgálatoknál alkalmazott anyagok anyagjellemzőinek és peremfeltételeinek összefoglalása
12. táblázat: A kísérletterv faktorok szintjei
13. táblázat: Hőelemek egymástól való eltérései
14. táblázat: A kA szorzat értékei

15. táblázat: A maximális hőmérsékletkülönbségek értékei és annak időpontja a modell élhosszainak függvényében
16. táblázat: Az elemzés során kapott állandók értékei
17. táblázat: A vizsgálat eredményeit összefoglaló táblázat
18. táblázat: A 3 illetve 10 méter magas modellek eredményei
19. táblázat: A vizsgálat eredményei
20. táblázat: A maximum hőmérsékletek különbsége (vasbeton-beton) adott peremfeltételek mellett az idő függvényében
21. táblázat: A vizsgálat eredményei

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A cement kötésének és szilárdulásának alakulása az idő függvényében [1]
2. ábra: A zöld és a fiatal beton húzási tulajdonságai [2]
3. ábra: Egy PCC rendszer feszültség – nyúlás diagramja
4. ábra: A betonszerkezetek teljesítőképességének csökkenése a korral [14]
5. ábra: A betonok/tömegbetonok és a velük szemben támasztott követelmények közötti összefüggések (általam szerkesztett)
6. a, b ábra: Tömegbeton szerkezetek mezőkre osztása szimulációs modellezéshez
a, alaplemez, gerenda; b, felmenő falszerkezet [19]
7. ábra: A klinker fázisok hidratációs termékének szilárdulási folyamata [25]
8. ábra: Hőfejlődés folyamata a hidratáció során [24]
9. ábra: A kéregrepedés fogalma a) egyenlőtlen hőmérséklet a falban; b) a húzó és nyomófeszültségek [4]
10. ábra: Az átmenő repedés fogalma a.) az alaptest és a felmenő fal között golyóscsapágy van, a felmenőfal szabadon alakváltozhat; b.) ha a fal és az alaptest össze van építve, repedések keletkeznek [4]
11. ábra: Feszültségeloszlás a falszerkezetben [18]
12. ábra: A beton kiszáradási zsugorodásának csökkentése automata utókezelő rendszerrel [33]
13. ábra: Az 1.sz próbadarab automata utókezelő rendszerrel és 2. számú általános utókezeléssel ellátott próbadarab egyszerűsített modelljei [33]
14. ábra: A mért hőmérsékletek és hőmérséklet-különbség [33]
15. ábra: A tervezett rakpart szerkezeti geometriája tömegbetonból [34]
16. ábra: Az 1:4 arányú vasbeton kísérleti modell [35]

17. ábra: A hőelemek kialakítási lehetőségei [49]
18. ábra: Mérési eredmények a termoelemes hőmérő használatával [17]
19. ábra: Az SHT érzékelő felépítése [34]
20. ábra: Az SHT21S érzékelők beépítése [51]
21. ábra: A féladatikus modell [54]
22. ábra: A különböző méretű próbatestek és a hőszigetelő réteg méretei [54]
23. ábra: A habarcstartály
24. ábra: EPS tábla vágási terve
25. ábra: A kaloriméter metszetben
26. ábra. A mérési adatgyűjtő összeállítási rajza
27. ábra: A végleges mérési adatgyűjtő összeállítási rajza
28. ábra: Duna Dráva Cement Kft.- től kapott cement mintákhoz tartozó vizsgálati eredmény
29. ábra: A CEM III B 32,5 N cement hőtermelése az idő függvényében
30. ábra: A geometriai modell, valamint a kezdeti- és peremfeltételek és hálózás
- 31 a.) és b.) ábra: A talaj és beton szilárdtest egymáshoz képesti elhelyezkedése és hálózása
32. ábra: A modell kiindulási geometriája és hálózása
33. ábra: A környezeti hőmérséklet változása az idő függvényében.
34. ábra: A nyolcad-modell $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ értékű konvektív hőtranszport együttható értékkel a sárgával jelölt felületeken
35. ábra: A betonacélok elhelyezkedése a nyolcadmodellben
36. ábra: A vasbeton modell szimmetriasíkjában a hőmérséklet eloszlás $h=30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, valamint $T=5^\circ\text{C}$ esetén
37. ábra: A betonacélok elhelyezkedése a modellben 225 mm és 145 mm osztásközzel
38. ábra: A végeelem modell finomhálózása
39. ábra. Hőmérséklet- idő diagram feldolgozáshoz használt alakja
40. ábra: Hőmérséklet- idő diagram CEM III esetén
41. ábra: Hőtermelés- idő diagram CEM III esetén
42. ábra: A CEM I és a CEM III hőtermelése $T= 20^\circ\text{C}$ és $h=5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ esetén
43. ábra: A CEM I (bal oldal) és a CEM III (jobb oldal) típusú cementekkel készült beton modellek hőeloszlása $T= 20^\circ\text{C}$ és $h=5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ esetén
44. ábra: A CEM I minimális és maximális hőmérsékletének, valamint a hőmérsékletkülönbségek alakulása az idő függvényében $T= 20^\circ\text{C}$ és $h=5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ esetén

45. ábra: A CEM III minimális és maximális hőmérsékletének, valamint a hőmérsékletkülönbségek alakulása az idő függvényében $T= 20^{\circ}\text{C}$ és $h=5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ esetén
46. ábra: A hőmérsékletváltozás az idő függvényében hőszigetelt beton $T= 20^{\circ}\text{C}$ és $h=5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ esetén
47. ábra: Az élhossznak a hőmérsékletkülönbségre gyakorolt hatása $T= 20^{\circ}\text{C}$ és $h=5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ esetén
48. ábra: Hőmérsékletváltozás az idő függvényében $h= 15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $T= 20^{\circ}\text{C}$ esetén
49. ábra: A nyolcad modell szimmetriasíkjában a hőmérséklet eloszlás $h=30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, valamint $T=5^{\circ}\text{C}$ esetén.
50. ábra: A konvektív hőtranszport együttható alakulása a hőmérséklet különbség függvényében $T= 10^{\circ}\text{C}$
51. ábra: A hőmérséklet különbség alakulása a hőmérséklet függvényében, $h= 10 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ esetén
52. ábra: A hőmérséklet különbség, a hőmérséklet és a konvektív hőtranszport együttható kapcsolata (1) szerint
53. ábra: A hőmérsékletek alakulása a beton próbatestben
54. ábra: A talajfelszínen kialakuló minimum és maximum beton hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet különbség alakulása $h=5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ esetén az idő függvényében
55. ábra: A talajfelszínen kialakuló minimum és maximum beton hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet különbség alakulása $h=30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ esetén az idő függvényében
56. ábra: A talajban kialakuló minimum és maximum beton hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet különbség alakulása az idő függvényében
57. ábra: A talajban és talajfelszínen kialakuló minimum és maximum beton hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet különbség alakulása az idő függvényében
58. ábra: A hőmérséklet eloszlás a 3 méter magas modellen
59. ábra: A hőmérséklet alakulása $h=5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $T=5^{\circ}\text{C}$ a 10 méter magas modellben
60. ábra: A betontest hőmérsékleti eloszlása $T=20^{\circ}\text{C}$ esetén
61. ábra: A betonban kialakuló hőmérsékletek állandó környezeti hőmérséklet esetén
62. ábra: A betonban kialakuló hőmérsékletek változó környezeti hőmérséklet esetén
63. ábra: A hőmérsékletkülönbségek alakulása állandó és változó környezeti hőmérsékletek esetén

64. ábra: A minimum és maximum hőmérsékletek alakulása $h=30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, valamint $T=5^\circ\text{C}$ esetén az idő függvényében
65. ábra: A hőmérséklet maximumok hőmérséklet különbségeinek alakulása
66. ábra: A vasbeton modell szimmetriasíkjában a hőmérséklet eloszlás $h=5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, valamint $T=30^\circ\text{C}$ esetén
67. ábra: A minimum és maximum hőmérsékletek alakulása $h=30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, valamint $T=5^\circ\text{C}$ esetén az idő függvényében
68. ábra: A minimum és maximum hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet különbség alakulása $h=5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, valamint $T=30^\circ\text{C}$ esetén az idő függvényében

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom a sok biztatásért, önzetlen, segítő támogatásért mindazoknak, akik utamon elindítottak és különösen azoknak, akik mindvégig mellettem voltak.

Név szerint Prof. Dr. M. Csizmadia Bélának és Prof. Dr. Telekes Gábornak, akik a tudományos munkám kezdeteinél utat mutattak és támogattak.

Szeretnék köszönetet mondani Prof. Dr. Réger Mihály Antalnak és Prof. Dr. Zachár Andrásnak, hogy vállalták a témavezetésem és rengeteg hasznos ötlettel, gyakorlati tanáccsal támogatták kutatásom eredményességét.

Köszönöm a Duna-Dráva Cement Kft.-nek, különösen Réti József laboratórium vezetőnek a cementminták adományozásáért és a szabványos mérési adatok szolgáltatásáért.

Köszönöm Prof. Dr. Goda Tibor János DSc, a Biztonságtudományi Doktori Iskola vezetőjeként tanúsított támogatását, kutatásom segítését, illetve köszönöm a Biztonságtudományi és Kibervédelmi Intézetnek, hogy laboratóriumi méréseimnek helyet biztosított.

Köszönettel tartozom Prof. Dr. Rajnai Zoltánnak, hogy biztosította a kutatási eredményeim hazai és nemzetközi fórumokon való bemutatását és publikálását.

Szeretném megköszönni továbbá Kollégáimnak, hogy idejüket önzetlenül rám szánták, hasznos tanácsaikkal, értékes kérdéseikkel segítették előrehaladásom a kutatásban. Név szerint Horváthné Dr. Drégelyi -Kiss Ágotának, Prof. dr. Pokorádi Lászlónak, Dr. Varga Péternek, Dr. Horváth Richárdnak, Dr. Mucsi Andrásnak, Dr. Gonda Viktornak, Dr. Réti Tamásnak, Dr. Nagy Rudolfnak, Dr. Szlivka Ferencnek és Dr. Szabó Gyulának.

Végtelenül hálás vagyok szüleim türelméért, köszönöm noszogatásukat vagy éppen beletörődő hallgatásukat, megértésükért.

Köszönettel tartozom barátnőimnek a támogató és előremutató beszélgetéseikért, valamint dr. Mascher Róbertnek, hogy biztatva lelkesített, ezzel átsegítve a hullámvölgyeken.

Külön szeretném megköszönni Dr. Barányi Istvánnak, hogy kalandossá és felejthetetlenné tette utamat, nélküle biztosan nem jutottam volna el idáig.