



DOMONYI ERZSÉBET

Kritikus infrastruktúrák tömegbeton szerkezeteinek korai repedéskockázata és befolyásoló tényezői

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

Nyilvános védés teljes bizottsága:

Elnök:

Prof. Dr. Berek Lajos

Titkár:

Dr. Varga Attila

Tagok:

Dr. habil. Molnár Ildikó

Prof. Dr. Kovács Tünde Anna

Prof. Dr. Zsidai László

Bírálok:

Prof. Dr. Szlivka Ferenc

Dr. Takács Márton

Nyilvános védés időpontja:

2026

NYILATKOZAT

**A MUNKA ÖNÁLLÓSÁGÁRÓL, IRODALMI FORRÁSOK MEGFELELŐ
MÓDON TÖRTÉNT IDÉZÉSÉRŐL**

Alulírott, **Domonyi Erzsébet** kijelentem, hogy a **Kritikus infrastruktúrák tömegbeton szerkezeteinek korai repedéskockázata és befolyásoló tényezői** című benyújtott doktori értekezést magam készítettem, és abban csak az irodalmi hivatkozások listáján megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen megjelöltem.

Budapest, 2026.05.04.

Domonyi Erzsébet

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS	7
A tudományos probléma megfogalmazása	7
A kutatómunka célkitűzései	7
A TÉMA KUTATÁSÁNAK HIPOTÉZISEI	8
KUTATÁSI MÓDSZEREK	9
1. A KRITIKUS INFRASTRUKTÚRA LÉTESÍTMÉNYEIBEN MEGJELENŐ TÖMEGBETON SZERKEZETEK.....	10
1.1 A kritikus infrastruktúra létesítményei.....	10
1.2 A tömegbetonok	12
1.2.1 A tömegbeton fogalma	12
1.2.2 A betonok kötési és szilárdulási fázisai.....	14
1.2.3 A beton kötése során fejlődő hidratációs hő	16
1.2.4 A tömegbeton szerkezetekben létrejövő repedések kialakulása és elkerülése .	19
1.2.5 A tömegbeton szerkezetek kéreg- és átmenő repedései	22
1.2.6 A tömegbeton szerkezetek hőmérséklet-eloszlását befolyásoló tényezők	25
1.3 Hőmérsékletmérési módszerek a tömegbetonok felszínén és belsejében	34
1.3.1 A cementhidratációs hő mérése.....	34
1.3.2 A tömegbeton szerkezetben kialakuló hőmérsékletek mérése	36
1.4 Számítási módszerek a VEM és DEM segítségével.....	37
1.5 A tömegbeton szerkezetek készítésekor felmerülő leggyakoribb problémák	39
A vasbeton és a betonacélt nem tartalmazó szerkezetek hőmérsékleteinek alakulása	41
A talaj és a levegő hatása a beton próbatestre	43
Változó környezeti hőmérséklet hatása a tömegbeton szerkezet hőmérsékleti mezőjére	44
1.6 A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése	45

2. EGYEDI FEJLESZTÉSŰ KALORIMÉTERES MÉRÉS ÉS FEM- ALAPÚ HŐTECHNIKAI MODELLALKOTÁS	46
2.1 Egyedi kaloriméter tervezése és összeállítása	46
2.2 Az egyedi fejlesztésű kaloriméterben tervezett mérés ismertetése	52
2.3 FEM-alapú hőtechnikai modellalkotás.....	53
2.3.1 Az analízis során alkalmazott anyagok tulajdonságai	54
2.3.2 Az analízishez használt cement és az abból készült cementhabarcs tulajdonságai.....	55
2.3.3 A végelelemes analízis módszerének bemutatása	56
2.4 A szimulációk során alkalmazott kezdeti- és peremfeltételeinek ismertetése	57
2.4.1 Különböző méretű beton próbatestek összehasonlító vizsgálata CEM III típusú cementből készült beton esetén	57
2.4.2 Az 1 m ³ -es beton próbatest hőmérsékleteinek vizsgálata CEM III típusú cement használata esetén.....	58
2.4.3 A talaj befolyásoló hatásának vizsgálata.....	59
2.4.4 A talaj és a levegő hőelvonó hatásának vizsgálata.....	60
2.4.5 A változó környezeti hőmérséklet hatásának vizsgálata a tömegbeton szerkezet hőmérsékleti mezőjére.....	61
2.4.6 A betonacél befolyásoló hatásának vizsgálata	62
2.4.7 A betonacél befolyásoló hatásának elemzése eltérő mennyiségű betonacél esetén.....	63
3. EREDMÉNYEK	65
3.1 Az egyedi fejlesztésű kaloriméter hőtani jellemzőinek meghatározása.....	65
3.2 A CEM I és a CEM III típusú cementek hőtermelésének meghatározása és az eredmények alkalmazása szimuláció során.....	71
3.3 Különböző méretű betontestek összehasonlító vizsgálatának eredményei a CEM III típusú cementből készült beton próbatestek esetén.....	73
3.4 Az 1 m ³ -es beton próbatest hőmérsékleteinek vizsgálati eredményei CEM III típusú cement használata esetén.....	75

3.5 A talaj befolyásoló hatásának vizsgálati eredményei.....	79
3.6 A talaj és a levegő hőelvonó hatásának vizsgálati eredményei.....	82
3.7 A változó környezeti hőmérséklet hatásának vizsgálati eredményei	84
3.8 A betonacél befolyásoló hatásának vizsgálati eredményei	87
3.9 A betonacél befolyásoló hatásának vizsgálati eredményei eltérő mennyiségű betonacél alkalmazása esetén	89
ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK	93
Kutatásom összegzése	93
Új tudományos eredmények.....	95
SUMMARY	97
TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK	99
IRODALOMJEGYZÉK.....	100
RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK	108
TÁBLÁZATJEGYZÉK	109
ÁBRAJEGYZÉK	110
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	114

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.

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 katasztrófhelyzetek kialakulása okán – különösen ügyelni kell a teherhordó szerkezet élettartamra való tervezésére és kivitelezésére.

A kutatómunka célkitűzései

A műszaki gyakorlatban a tömegbetonok készítésekor a legfőbb probléma a szerkezet belsejében és külső felszínén kialakuló hőmérsékletekből fakadó hőmérséklet-különbség kialakulásából ered. A tömegbeton szerkezetek alapvetően vastagok, nagy térfogatúak, amelyek hőtani viselkedés szempontjából már külön figyelmet érdemelnek, mert nagy a kivitelezéskori repedéskockázat esélye. Ebből is fakad, hogy a különleges technológiával készülő betonok csoportjába sorolhatóak, amelyet az 1.2.1 fejezetben részletesen ismertetek. A hőmérséklet-különbség mértéke, tehát erősen befolyásolja a készülő

betonszerkezet állékonyságát, teljesítőképességét, a megengedett érték túllépése a beton repedéseinek kialakulásához vezethet. 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 paramétereinek 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 megvalósításának főbb lépései 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 fajtákból készült cementhabarcs minták hőmérsékletének mérése az egyedi fejlesztésű kaloriméterben az adott cementekre jellemző cementhidratációs hő megállapításának céljából,
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 átalakíthatók 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 ismeretének birtokában – az éghajlattól függően - előre jelezhető olyan időpont, amely ideális a betonozás megkezdését illetően, és amelyet a szerkezet repedésveszélyének minimalizálása érdekében figyelembe lehet 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 felhasználhatók 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. A KRITIKUS INFRASTRUKTÚRA LÉTESÍTMÉNYEIBEN MEGJELENŐ TÖMEGBETON SZERKEZETEK

Ebben a fejezetben a kritikus infrastruktúrához kapcsolódó létesítmények és az abban megjelenő tömegbeton szerkezeteket mutatom be. A közönséges és a különleges technológiával készülő betonok ismertetése után a tömegbetonok készítésekor felmerülő problémákat ismertetem.

1.1 A kritikus infrastruktúra létesítményei

A kritikus infrastruktúra körébe tartozó létesítmények – úgy, mint a nukleáris létesítmények, völgyhidak vagy vízügyi gátak – alapvető szerkezeti stabilitását és védelmi funkcióit döntően nagytömeget képviselő beton- és vasbeton szerkezetek biztosítják. Ezen építmények rendkívüli keresztmetszeti méretei miatt a kivitelezés során alkalmazott tömegbetonok hőtani folyamatainak kontrollja kulcsfontosságú tervezési feladat. A technológia legnagyobb kihívását a cementhidratáció során felszabaduló jelentős mennyiségű hő jelenti, amely a szerkezet belseje és a külső környezet között számottevő hőmérséklet-különbséget generál. Amennyiben a keletkező termikus feszültségek meghaladják a beton aktuális húzószilárdságát, korai termikus repedések keletkeznek, amelyek közvetlenül veszélyeztetik a műtárgy tartósságát, vízzáróságát és végső soron a stratégiai ellátásbiztonságot. A hidratációs hőfejlődés pontos mérnöki modellezése és a hőtani folyamatok szigorú szabályozása tehát elengedhetetlen feltétele a létfontosságú rendszerelemek hosszú távú, üzembiztos működésének.

A kritikus infrastruktúra fogalma a 2024. évi LXXXIV. törvényben foglaltak szerint: *„olyan eszköz, létesítmény, építmény, berendezés, hálózat, rendszer, vagy ezek része, amely az alapvető szolgáltatás nyújtásához szükséges”* [1].

Egy létesítmény nem automatikusan válik a kritikus infrastruktúra részévé; hanem a törvényben meghatározott kijelölési eljárás eredményeképpen. A folyamat során az üzemeltetőnek vagy a hatóságnak meg kell vizsgálnia, hogy az adott elem kiesése (pl.

szerkezeti meghibásodás, támadás vagy üzemzavar miatt) átlépi-e a meghatározott ágazati küszöbértékeket (például az érintett lakosság vagy a gazdasági kár mértéke alapján).

A kritikus infrastruktúra elemei közül azok a legrelevánsabbak a hőtani vizsgálatok szempontjából, amelyeknél a geometriai méretek és a funkcionális elvárások (pl. vízzáróság, sugárvédelem) megkövetelik a tömegbeton-technológiát.

A 2004. évi LXXXIV. törvény 1. melléklete az ágazatok, alágazatok és alapvető szolgáltatások listáját tartalmazza, ahol a fő ágazatok az agrárgazdaság, egészségügy, energia, infokommunikációs technológiák, közigazgatás, közlekedés, pénzügy és a víz szektorok vannak nevesítve. Ezen belül az alágazatok és az alapvető szolgáltatások kerültek felsorolásra. Néhány példát kiragadva a kapcsolódó létesítmények vonatkozásában ide sorolhatjuk az agrárgazdaság esetén az élelmiszer logisztikai központokat, az egészségügy területéről az egészségügyi szolgáltatás épületeit vagy a gyógyszer- és vérellátás intézményeit. Az energiaellátás ágazatához kapcsolódóan a távfűtési hőközpontok vagy a fosszilis energiahordozók tárolására alkalmas épületek vasbeton alapszerkezetei, erőművek felépítményei. A vízgazdálkodási létesítmények esetén a völgyzárógátak és duzzasztóművek hajózsilip kamrái és fenéklemezei is zömében tömegbeton szerkezetek. A közlekedési infrastruktúra műtárgyai a hidak és völgyhidak masszív pillérei és alaptestei vagy alagutak vastag falazatú indítóaknáit és műtárgyai.

A működés közbeni igénybevétel és a technológiai szempontú csoportosítás esetén kiemelendők a vízzáró tömegbeton szerkezetek, azaz az ivóvíztározók és gátak esetében a hidratációs hő okozta repedések nemcsak szerkezeti, hanem közvetlen funkcionális hibát (szivárgást) okozhatnak. A sugárvédelmi tömegbetonok esetén az atomerőműveknél a beton sűrűsége és folytonossága a legfontosabb; a hőtani folyamatok okozta repedések itt sugáregészségügyi kockázatot is jelenthetnek egyben.

A nagy teherbírású alaptestek, mint például stratégiai raktárak, silók és adatközpontok mélyalapozásai, ahol a beton kötése közben kialakuló belső feszültségeloszlás határozza meg a későbbi teherbírást és a szerkezet teljesítőképességét nagy gondot kell fordítani a kivitelezésre. Továbbá a kivitelezés esetén a szerkezet geometriáját figyelembe véve is megkülönböztethetünk tömbszerű és sávszerű szerkezeteket. Tömbszerű szerkezetek a gátak, nagyobb létesítmények alaptestjei, sávszerű vagy oszlopos szerkezetek pedig a zsilipfalak, támfalak, hídpillérek.

Összességében elmondható, hogy a kritikus infrastruktúra körébe tartozó létfontosságú rendszerek fenntarthatósága nem választható el a kivitelezési fázis technológiai fegyelmeztől. Mivel ezen stratégiai jelentőségű műtárgyak tervezett élettartama gyakran meghaladja az 50-100 évet, a szerkezeti integritás megőrzése nem csupán műszaki, hanem nemzetgazdasági érdek is.

1.2 A tömegbetonok

Kutatásom éppen ezért ezen komplex létesítmények gazdaságos és tartós kivitelezésének megoldásai köré összpontosult. Olyan módszertani megoldásokat és hőtani kontroll-stratégiákat kerestem, amelyek lehetővé teszik a tömegbeton szerkezetek repedésmentes megvalósítását anélkül, hogy az a kivitelezési idő vagy a költségek indokolatlan növekedésével járna. Az értekezésben bemutatott vizsgálatok a tömegbeton szerkezetek kivitelezésénél felmerülő mérnöki problémákra fókuszálnak, választ adva arra, miként garantálható a kritikus infrastruktúra elemeinek hosszú távú üzembiztonsága a legmodernebb betontechnológiai eljárások és prediktív hőtani modellezés segítségével.

1.2.1 A 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."* [2].

Dr. Salem Georges Nehme szerint: *"Bármely szerkezet, amelynek vastagsága több mint 40 cm."* [3] 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 hidratációs hője miatt a tömegbeton szerkezetben nagy hőmérséklet és nagy hőmérséklet-különbségek 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 tömegbeton a különleges betonok csoportjába tartozó beton típus, amely csoport tagjai a **különleges rendeltetésű és különleges technológiával készült betonok** összessége. A különleges betonok csoportosítása az 1. táblázatban található [4].

A különleges rendeltetésű betonok	Különleges technológiával készített betonok
Vízzáró beton	Nagy tömegű beton
Kopásálló beton	Gőzölt beton
Könnyűbeton	Látszóbeton
Szálerősítésű beton	Dermesztett beton
Fagy- és sózásálló beton	Lövellt beton
Agresszív hatásnak ellenálló beton	Prepakt beton
Sugárvédő beton	Pörgetett beton
Hőálló és tűzálló beton	Vákuum-, vibrovákuum beton
Átlátszó beton	Víz alatti beton
Öntömörödő betonok	No-fines (egyszemcsés) beton

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

- Gőzölt 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].
- 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.

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, amely a betonszerkezet szilárdságát, illetve tartósságát ronthatja.

1.2.2 A betonok kötési és szilárdulási fázisai

A beton kötési és 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. A kutatásom szempontjából a legfontosabb mégis az állapothoz kapcsolható befolyásoló tényezők, mert ezek a tényezők a tömegbeton szerkezetek esetében is meghatározóak. Az 2. táblázat áttekintő képet ad a betonszerkezetek legfontosabb tulajdonságairól a betonkészítés egyes szakaszaira vonatkozóan.

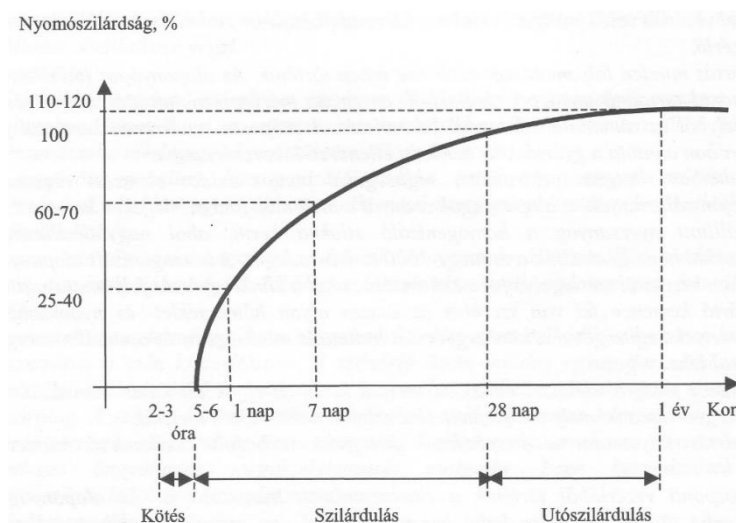
A beton kötése a cementnek vízzel való találkozása közben kialakuló hidratáció, amely egy kémiai folyamat és a bekeveréstől számított 2-12 óra időtartam alatt zajlik le. A beton szilárdulása pedig az ezt követő 27 nap, melynek során a betonszerkezet eléri a tőle elvárt nyomószilárdságát. A **fiatal beton** szilárdulási folyamata több tényezőtől függ, pl. a cement fajtája és szilárdulása, mennyisége, a víz-cement tényező, a tömörítés és utókezelés módja, a beton hidratációs hőmérséklete, a környezeti hőmérséklet, a 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 [7].

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

Megszilárdult beton	- 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, egyszerűen 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/m^3-ben, a bedolgozott frissbetonban; amely lehet: telítetlen, telített, túltelített [7].		

2. táblázat: A betonok legfontosabb jellemzői [4] alapján saját kiegészítésekkel

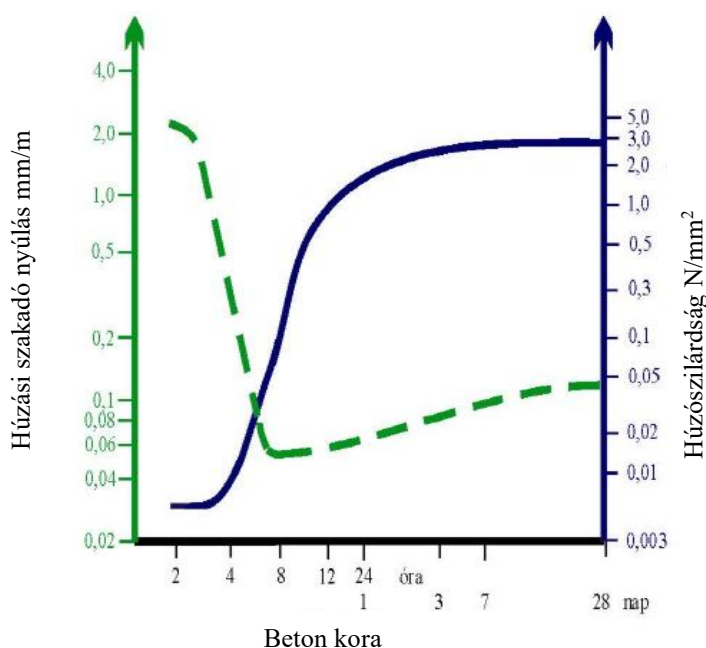
Zöld betonnak nevezik a beépített és betömörített, de még kötés előtt lévő friss betont, amelynek az ún. "zöld szilárdsága" ($0,1-0,3 \text{ N/mm}^2 - 0,5 \text{ N/mm}^2$) nem a hidratáció, hanem a cementpép folyáshatárának és az adhéziós erők működésének köszönhető.



1. ábra: A cement kötésének és szilárdulásának alakulása az idő függvényében [7]

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 [7].

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 [7].



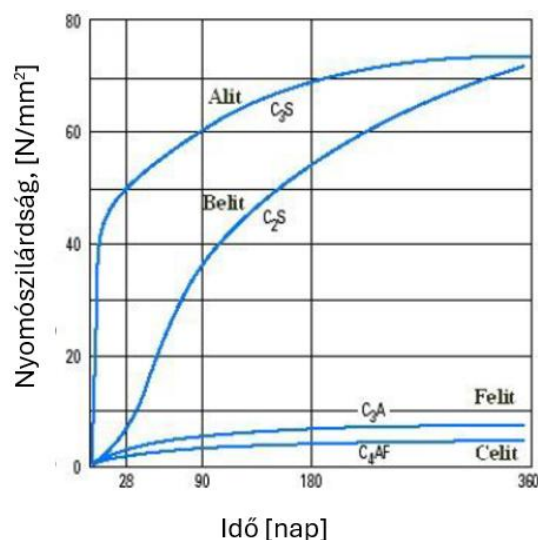
2. ábra: A zöld és a fiatal beton húzási tulajdonságai [8]

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 [9].

1.2.3 A beton kötése során fejlődő hidratációs hő

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 és számos kutató tovább fejlesztett a későbbiekben. Általános egyetértés alakult ki abban, hogy a beton szilárdulásának egyik legfontosabb befolyásoló tényezője a cement fajtája [10]. A cementnek vízzel való keveredése után a kalciumhidroxid-kalciumszilikát-

kalciumaluminát gélrendszerből szilárd cementkő alakul ki. A cement őrlési finomsága a reakcióképes fajlagos felületét tekintve befolyásolja a hidratációban résztvevő klinkerásványok részarányát, ennél fogva a cement kötőerejét, későbbi szilárdságát is befolyásolva. A klinker fázisok hidratációs termékének szilárdulási folyamatát a 3. ábra mutatja. A víz-cement tényező a frissbeton víz- és cementtartalmának tömegaránya, amely a beton nyomószilárdságának meghatározója. A zsugorodási folyamat lefutása vezethet a szerkezetben megjelenő repedések kialakulásához [10].

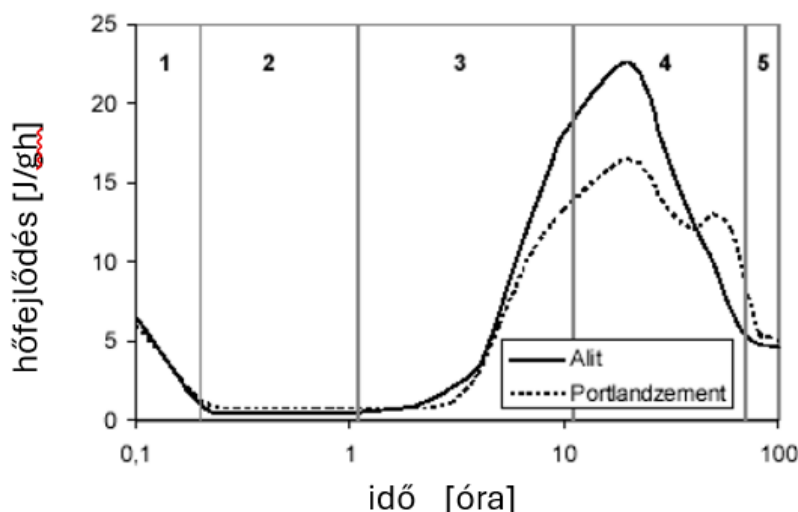


3. ábra: A klinker fázisok hidratációs termékének szilárdulási folyamata [11]

„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.” [10]. A hidratáció éveig eltartó folyamatát jellemezzük ezzel a mérőszámmal, ahol a hidratációs fok 0 a hidratáció kezdetén és 1 a teljes hidratáció esetén. A fejlődő hidratációs hő mennyisége a cement összetételétől függ. A klinkerásványok közül a trikálcium-alumináté a legnagyobb, a dikalcium-szilikáté a legalacsonyabb. A portlandcementek hidratációs hőjét kiegészítő anyaggal csökkentik. Tömegbetonok és nyári betonozás alkalmával a mérsékelt hőfejlesztésű cementek alkalmazása az ajánlott, így a beton szilárdulási üteme és vízigénye csökkenthető és konzisztenciája (frissbeton mozgással szembeni ellenállását, belső súrlódását, alaktartását fejezi ki) növelhető. A hidratáció sebessége és a hőfejlődés üteme nem egyenletes, öt fő szakaszra oszthatjuk, a folyamatot a 4. 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.



4. ábra: Hőfejlődés folyamata a hidratáció során [10]

A különböző cement típusok hidratációs hő fejlesztése az alábbiak szerint alakul [10]:

- portlandcement (CEM I)	375-525 J/g
- kohósalakportlandcement (CEM III)	355-440 J/g
- traszportlandcement	315-420 J/g
- alumínátcement (pl: bauxitcement)	545-585 J/g

A fenti értékek igen nagy intervallumban mozognak, így a tömegbetonok készítésekor fejlődő hidratációs hő mennyisége csak becsülhető. A tömegbetonok esetén a betontechnológusok a CEM III típusú, kis hőfejlesztésű cementet alkalmazzák a betonkeverék tervezésekor, ezzel is csökkentve annak lehetőségét, hogy a betonszerkezeten káros repedések jelenjenek meg [11].

A Duna Dráva Cement Kft. által a Váci Cementgyárban előállított és forgalmazott CEM III/B 32,5 N-LH/SR típusú kis hőfejlesztésű és szulfátálló kohósalakcement alkalmazásával csökken a betonban fellépő hőmérséklet-különbség okozta repedések kockázata, ezért felhasználása kifejezetten javasolt nyári melegben, nagy tömegű

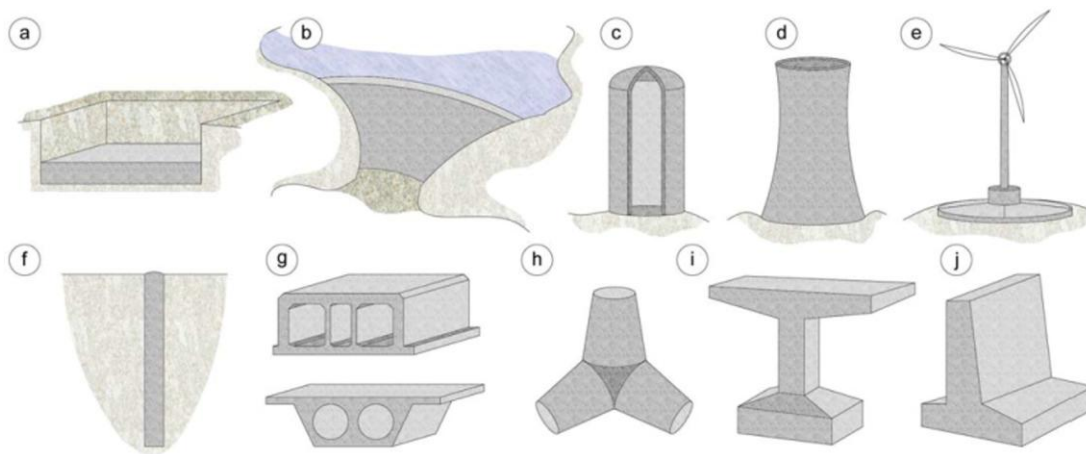
betonozás esetén. A gyártó által kiadott teljesítménynyilatkozat szerint ennek a cementtípusnak 270 J/g alatti a hidratációs hője [12].

1.2.4 A tömegbeton szerkezetekben létrejövő repedések kialakulása és elkerülése

B. Klemczak szerint a vékony és közepes betonszerkezetek esetében a cement hidratációja során keletkező hő minimális, a közönséges betonszerkezet repedésmentes kialakítása a megfelelő utókezelés alkalmazásával biztosítható [13].

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 [14].

Fragkoulis Kanavaris és szerzőtársai, mint a RILEM 254-CMS Műszaki Bizottság 7. munkacsoportjának tagjai esettanulmányukban foglalták össze a széles körre kiterjedő kutatásukat, amelyek a beton kötésének korai szakaszában fellépő repedésveszélyre koncentrált. A kutatásuk során számos tipikus tömegbeton szerkezetet vizsgáltak meg, a vizsgált építmények vázlatos képét az 5. ábra foglalja össze. Tanulmányuk zárásaként a tervezés előtti átfogó értékelése vonatkozó gyakorlati ajánlásokat fogalmaztak meg.



5. ábra: A vizsgált építmények vázlatos képei: a) alaplemezek, b) betongátak, c) silók/tárolószerkezetek, d) hűtőtornyok, e) szélturbina-alapok, f) cölöpök, g) előregyártott elemek (felső kép: víz alatti alagút, alsó kép: hídpálya), h) védőburkolatok, i) hídpillérek és j) támfalak [15]

A kutatócsoport a vizsgálataik során a repedés kialakulásának kockázatát vizsgálták és dolgoztak ki értékelési eljárást annak elkerülése érdekében [15].

Xiaoda Li és munkatársai tanulmányukban egy kínai, a Shantou városában épült tömegbeton alagút kivitelezését mutatják be. Először végelelemes analízissel elemezték az elemek hőtechnikai viselkedését és a repedéscockázatot, majd becsülték a tervezett hűtővízvezetékek hatását. Ezt követően a beton kötése során folyamatosan figyelemmel kísérték az egyes elemek hőmérséklet alakulását, és két repedésgátló módszert (gradiens beton és műanyag repedésgátló rács) javasoltak. A szimulációs eredmények jól egyeztek a tényleges hőmérséklet alakulással, és a két javasolt repedésgátló módszert a tényleges repedés megfigyelések is igazolták. A javasolt módszerek hatására a konstrukció egyik elemében 80 %-kal csökkent a repedések száma, 41%-kal a repedések hossza és 13%-kal a repedések szélessége. Továbbá a belső és külső hőmérséklet-különbségek 25%-kal, illetve 52%-kal csökkentek [16].

A vastagabb szerkezetek, tömegbetonok belső részén közel adiabatikus viszonyok vannak, a beton és környezete közötti korlátozott hőcsere miatt. Ennek következtében a tömegbeton szerkezet belső részén a hőmérséklet elérheti az 50 - 70 °C-t is [13, 17]. A 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 hőmérséklet-különbség nem lehet nagyobb, mint 20 °C [17, 18].

Betonozni +5 °C és +30 °C hőmérsékleti határok között ajánlott [19]. A mértékadó hőmérséklet (T_m) a következő képletből számítandó:

$$T_m = \frac{2T_b + T_1}{3} \quad (1)$$

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) [19].

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 3. táblázatban a tömegbeton szerkezeteken megjelenő repedések kiváltó okait csoportosítottam. A repedések kialakulása a beton

kötésekor bekövetkező térfogatváltozásra vezethető vissza. Ezen térfogatváltozások leginkább a hőmérséklet-különbségből és a nedvességtartalom csökkenéséből adódnak.

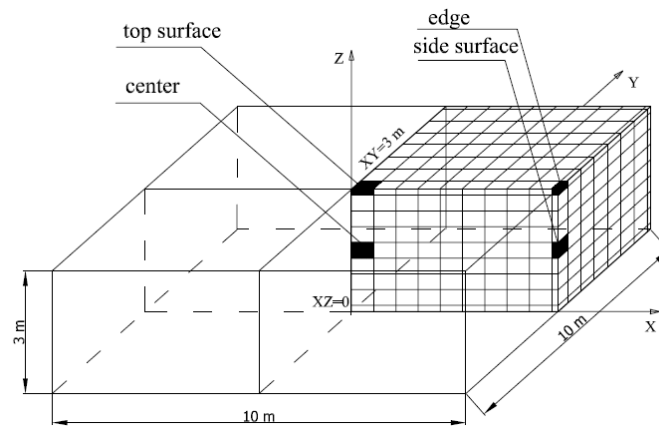
Xu-Jing Niu és munkatársai cikkükben a környezeti hőmérséklet, a relatív páratartalom és a szélsébség hatását vizsgálták egy tömegbetonból készített gát esetében. A szakaszos betonozással készülő tömegbeton szerkezetéről megállapították, hogy a betonszakaszoknál a környezeti hőmérséklet vagy a szélsébség emelkedése, illetve a relatív páratartalom csökkenése felgyorsíthatja a hidratációhoz szükséges mennyiségű víz elpárolgását ezzel csökkentve a szerkezet felszíni víztartalmát. Ez a jelenség a kötési minőség romlása mellett a rétegek közötti területen a beton pórus szerkezetének durvulását okozza, amely a betonszerkezet teljesítőképességét rontja [20]. A relatív páratartalom és a széndioxid hatását vizsgálta P. Liu szerzőtársaival cikkükben, amely a betonszerkezet károsító karbonátosodását okozza [21].

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
	Hőmérsékleti hatások			Száradási zsugorodás
		Korai fagykár	Hőmérsékleti hatások	Fagyás-olvadás ciklus
		Téli / nyári betonozásból adódó hőmérséklet-különbség		Évszaktól függő hőmérséklet-változás
				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

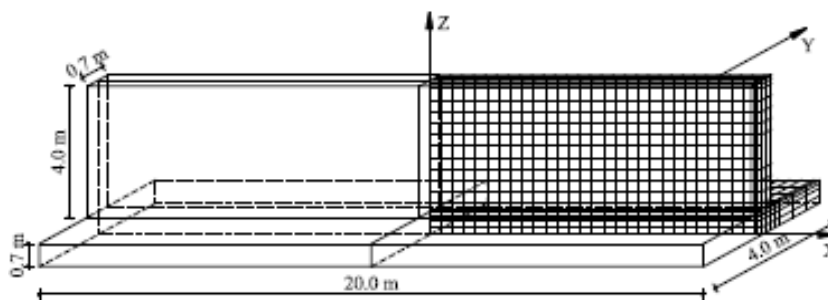
3. táblázat: A tömegbetonokban kialakuló repedések kiváltó okai

A repedések kialakulásának előrejelzését vissza lehet vezetni a tömegbeton szerkezetekben kialakuló hőmérséklet-eloszlásra. B.A Klemczak a repedésképek feltérképezéséhez két

alapvető szerkezet vizsgált. 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 [22]. Mindkét esetben a modellt inhomogén szerkezetként vette figyelembe a szerző. Ennek oka, hogy a nagy vertikális (falszerkezet) ill. horizontális (alaptest) kiterjedésű betontömbök esetében különböző hőmérsékletű és nedvességtartalmú mezők alakulnak ki.



6. a ábra: Tömegbeton szerkezetek mezőkre osztása szimulációs modellezéshez, alaplemez, gerenda [22]



6. b ábra: Tömegbeton szerkezetek mezőkre osztása szimulációs modellezéshez, felmenő falszerkezet [22]

Az egyes mezők közel azonos kezdeti és peremfeltételekkel rendelkeznek, de geometriájukban és elhelyezkedésükben már jelentősebb eltérést mutatnak [22].

1.2.5 A tömegbeton szerkezetek kéreg- és átmenő repedései

A hidratációs hő definíciója: amikor a cementet vízzel összekeverjük, exoterm kémiai reakció jön létre, melyet hidratációnak, és a hidratáció során felszabaduló, tömegegységre vonatkoztatott reakcióhőt hidratációs hőnek nevezünk [4]. A hőfejlesztés összmenyisége

függ a cement fajtájától és a beton kezdeti hőmérsékletétől [3]. Vastag falú szerkezeteknél, tömegbetonoknál szerkezetben a felmelegedés és lehűlés hatására bekövetkező egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás, 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]. A cement hidratációja során felszabaduló hő hatására a beton felmelegszik és tágul, majd a lehűléskor bekövetkező fajtérfogat-csökkenés (összehúzódás) belső feszültségeket ébreszt. Amennyiben ez a mozgás a környezet vagy a belső mag kötöttsége miatt gátolt, a szerkezet megrepedhet.
2. egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás: 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].

A bezsaluzott betonfalban egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás 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 módját a (2) egyenlet írja le. A fal szélén a ΔT hőmérséklet-különbségből húzófeszültség keletkezik, amely a 7. a és b ábrán látható.

$$f_{ct} = \alpha \Delta T E_{ot} \quad (2)$$

A képletben:

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

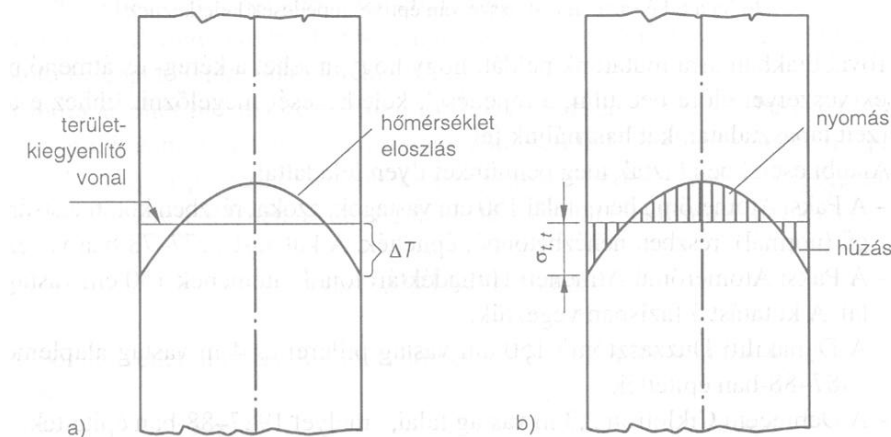
α = a beton hőtágulási együtthatója, [$1/^{\circ}\text{C}$]

ΔT = a területkieganyagítással nyert hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]

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 és **kéregrepedés** alakulhat ki. Ez a

kéregrepedés nem mély, de el kell kerülni, mert a repedések a beton károsodását elősegítik. A 7.a) ábrán látható ΔT érték a hőmérséklet-eloszlás görbéjének meredekségétől függ. A függvény maximumának és minimumának a területkiegyenlítő vonalhoz viszonyított távolságát a hőmérsékleti gradiens határozza meg. A hőmérsékleti gradiens nagysága befolyással van a kéregrepedések kialakulására.



7. ábra: A kéregrepedés fogalma

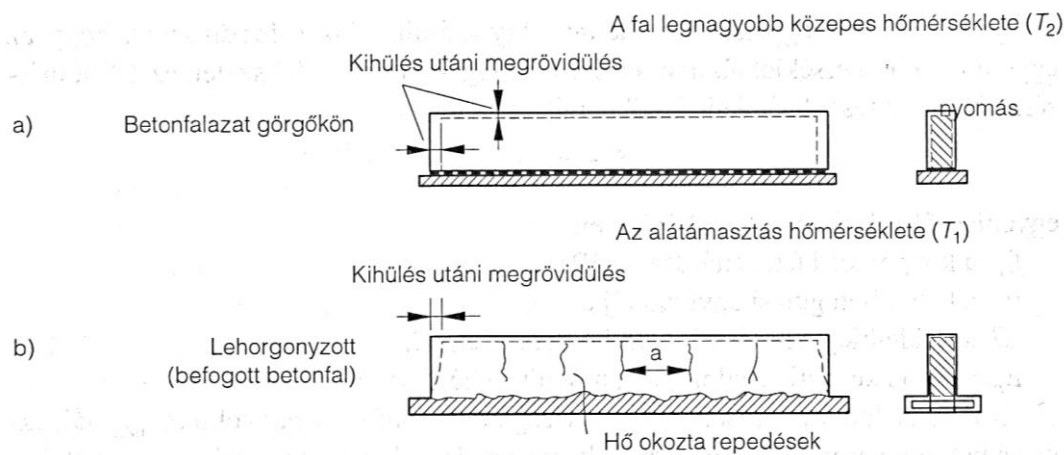
a) egyenlőtlen hőmérséklet a falban; b) a húzó és nyomófeszültségek [4]

A hőmérsékleti gradiens vektormennyiség, melynek komponensei a $T(x,y,z)$ hőmérsékleti tér helykoordináták szerinti parciális deriváltjaival fejezhető ki (3):

$$\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (3)$$

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 [4].

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, amelyet a 8. ábra mutat be [4]. A mérnöki gyakorlat számára fontos tehát tudni, hogy a repedés milyen jellegű (átmenő- vagy kéreg), illetve mérete a megengedett értéken belüli, vagy meghaladja azt.

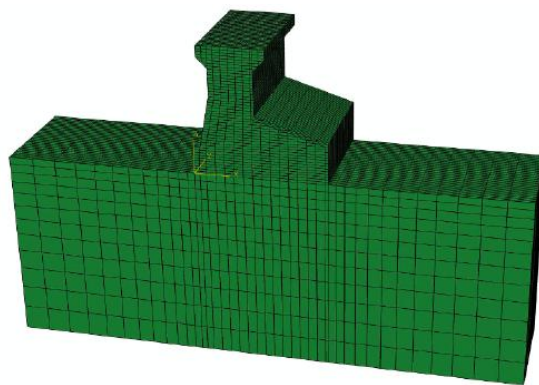


8. ábra: Az átmenő repedés fogalma a.) az alaptest és a felmenő fal között görgősor van, a felmenő fal szabadon alakváltozhat; b.) ha a fal és az alaptest össze van építve, repedések keletkeznek [4]

1.2.6 A tömegbeton szerkezetek hőmérséklet-eloszlását befolyásoló 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.

Yuxiang Zhang és szerzőtársai a Tibetben található Jinqiao gravitációs gát tervezésekor alkalmaztak végeeselemes analízist, amely során a **szél** befolyásoló hatását is vizsgálták. A nagy magasságú, hideg régiókban ez a környezeti tényező fokozottan jelen van és hatása nem elhanyagolható betontechnológiai szempontból. A víztározó gát geometriájából adódóan, amelyet a 9. ábra szemléltet és jól látható, hogy nagy felületen éri a szerkezetet a szél, mint környezeti hatás. A hatás ellensúlyozására a szerzők polisztirol hőszigetelő lemezek elhelyezését javasolták a beton kötési szakaszában, ezzel biztosítva a beton belseje és a felszíne között kialakuló hőmérsékletkülönbség csökkentését [17].



9. ábra: A Jinqiao víztározó gát látképe és a végelelemes modell [17]

A szélsőséges hideg időjárással szemben a magas hőmérsékletben való betonozás is növeli a repedéskockázatot, ennek a lehetőségét S. Wang és munkatársai mutatták be cikkükben. A betonkeverék alacsony víz/cement arányú, acélszálakkal erősített volt, amelyről kiderült, hogy magas hőmérsékleten jobb hőtani jellemzőkkel bír, mint a szálerősítés nélküli [23].

A **szél hatása**, a beton zsaluzatlan, 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 zsaluzattal borított felületeken is érvényesül. Összességében tehát a szél a konvekciót módosítja, ezáltal befolyással van a kialakuló hőmérsékletekre [4, 17, 24].

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

$$\text{A forrástag számítása: } q_n = A_N I_N \frac{\Delta A}{\Delta V} \quad (4)$$

ahol: A_N : a felület napsugárzásra vonatkozó abszorpciós tényezője,

I_N : a napsugárzás intenzitása,

ΔV : a vizsgált térfogatelem nagysága [4].

T Honorio cikkében felhívja a figyelmet, hogy a számításba kell venni a megépítendő szerkezet tájolását is, hiszen a nyári betonozás esetében - betartva a nyári betonozás szabályait - a napsugárzás aszimmetrikusan éri a betonszerkezetet a kritikus kötési idő alatt [24].

Yuqin Zhao és munkatársai a tömegbeton szerkezetek hőmérséklet szabályozási és repedésmegelőzési intézkedéseinek javaslattételei előtt több paraméter mellett a napsugárzás hatását, a napenergia-elnyelést paraméterként illesztették vizsgálataikba [26]. 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 [19, 20].

Yinuo Zhang és mtsai szerint a beton belseje és külseje közötti hőmérséklet-különbség hatékonyan csökkenthető a környezeti hőmérséklet növelésével, a hűtővíz áramlási sebességének növelésével, a beton öntés utáni kezdeti hőmérsékletének csökkentésével vagy a hűtővíz hőmérsékletének csökkentésével, ezáltal csökkentve a repedések kialakulásának esélyét [27]. A szakirodalom több hasonló megállapítást tartalmaz a környezeti hőmérséklettel kapcsolatosan. A témában kutató szerzők megerősítik, hogy a tömegbeton szerkezetekben kialakuló hőmérséklet-különbséget erősen befolyásoló tényező [28-30].

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 [3,20].

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. Az alaptest mélységétől függően a különböző vastagságú alaplemezekben szintén kialakulnak az eltérő hőmérsékletű és nedvességtartalmú mezők [14,16].

A **beton alkotóelemeinek mennyisége és minősége** is befolyásoló hatással van a betonszerkezet hőmérséklet eloszlására [30,31]. A hőmérsékleti feszültségek kialakulása szempontjából a cement fajtájának (ásványi összetétel, őrlési finomság), a cementtartalomnak, a cement korának van a legnagyobb szerepe. Az ettringit ($Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$) képződést és annak hatását a megszilárdult betonra már 1945 óta vizsgálják [32]. 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. Az ettringit tehát káros, a repedések létrejöttét elősegíti, hiszen a kristályosodás nem kívánt méretű és torz szerkezetű üregeket és pórusokat hoz létre a betonban [33].

Guowen Sun és szerzőtársai cikkükben szisztematikusan vizsgálták a portlandcementekből készült tömegbeton receptúrák víz-cement arány, a cement finomsága és a kötési hőmérséklet és a relatív páratartalom kulcsfontosságú paramétereinek a betonszerkezet belsejében kialakuló hőmérsékletre és a termikus feszültségre gyakorolt hatását. Kutatásuk során kidolgoztak egy háromdimenziós végeselemes modellt a tömegbeton hőmérsékleti mezőjének, hőfeszültségi mezőjének és korai kötés közbeni károsodásának alakulására vonatkozóan, amelyeket kísérletekkel igazoltak. A paraméteres elemzés azt mutatta, hogy az alacsonyabb víz-cement arány és a nagyobb cementfinomság növeli a szerkezet belsejében kialakuló maximális hőmérsékletet és a maximális nyomószilárdságot. A magasabb kötési hőmérséklet felgyorsítja a hidratációt és növeli a hőmérsékleti maximumot, valamint a nyomószilárdságot, míg a hőmérsékleti minimumok nagyobb hőmérsékletcsökkenéshez és nagyobb húzófeszültséghez vezetnek a lehülési szakaszban. A tanulmányban bemutatott előrejelzési módszer elméleti alapot és gyakorlati útmutatást nyújt a beton keverékarány optimalizálásához, a hőmérséklet-szabályozási intézkedésekhez a nagy tömegű betonok tervezésében, és segít csökkenteni a hőre visszavezethető repedés kockázatát, valamint javítani a beton tartósságát [34].

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 [35].

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 hidratációs hő függ a cement őrlési finomságától. A finomabb őrlés nagy fajlagos felületet jelent, ezért a hidratáció gyorsabban megy végbe [4, 34].

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 össz mennyiségét 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 [3].

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 (5) segítségével.

$$R_{c,m} = A \left(\frac{1}{x} - B \right) \quad (5)$$

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 összefüggés szerint 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 [7, 23,30, 34].

A **kötésszabályozó adalékszerek** hatása többféle lehet. Kötésgyorsító adalékszereket hideg időben, kötésslassító adalékszereket pedig nyári melegben kell alkalmazni. A kezdeti hőfejlődés szabályozása a cél ezen vegyszerek adagolásával [30]. A kötéseksleltető

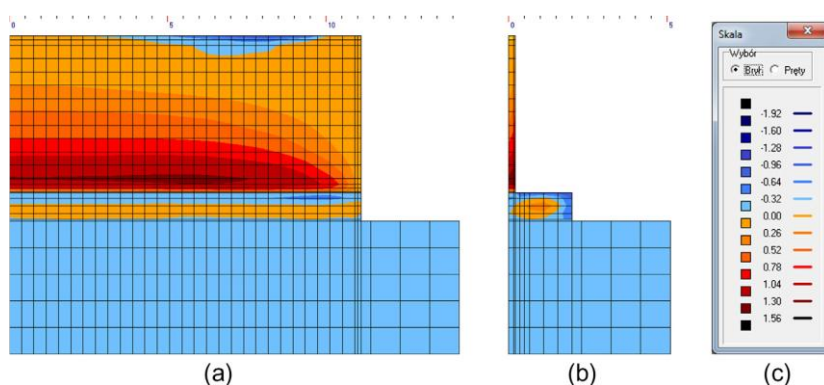
adalékszerek ugyan a kezdeti hőfejlődést csökkentik, de az összes keletkező hőmennyiséget nem befolyásolják. Továbbá előnye, hogy a beton hosszabb ideig marad bedolgozható (12-16 óra) állapotban és a többrétegű betonozás esetén a rétegek összevibrálhatósága biztosítva marad [3].

A **beton termikus tulajdonságaival** kapcsolatban 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 esetén [3]. A beton rossz hővezető, amely lassítja a természetes hűlési folyamatot. 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 [3]. 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 H.R. szerint a normálbeton fajhőjére az adalékanyag fajtája, keverési arány és a beton kora nincs hatással, az adalékanyag termikusan stabil [36].

A **betontechnológiai tényezők** is befolyásolják a betonszerkezet hőmérséklet eloszlását [37]. 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 [3]. A zsaluzat minősége tehát a hőmérséklet-eloszlásra 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 hőmérséklet-különbség (max. 15 - 25 °C).

A kizsaluzás időpontjában a megengedhető hőmérséklet-különbség 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 hőmérséklet-különbség [13], az EUROCODE ezt az értéket 20 °C-ban maximalizálta [18]. Ezzel ellentétben Yunchuan a 35 °C-os hőmérséklet-különbség elérését sem tartja károsító hatásúnak [38]. A kizsaluzást 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) [14].

Klemczak végeselemes vizsgálata a zsaluzat korai, azaz 3 nap utáni eltávolításának hatásait elemezte. A 10. ábrán a feszültségeloszlás látható a falban és az alapozásban 70 órával a fal öntése után [13]. A vizsgált méret 22,2 m hosszú, 4,1 m magas és 40 cm vastag fal, amely alatt 4 m széles és 70 cm vastag, azonos hosszúságú folytonos sávalapozás készült. A végeselemes analízisnél a szerkezet szimmetrikussága miatt a szerkezet ¼-e került modellezésre.

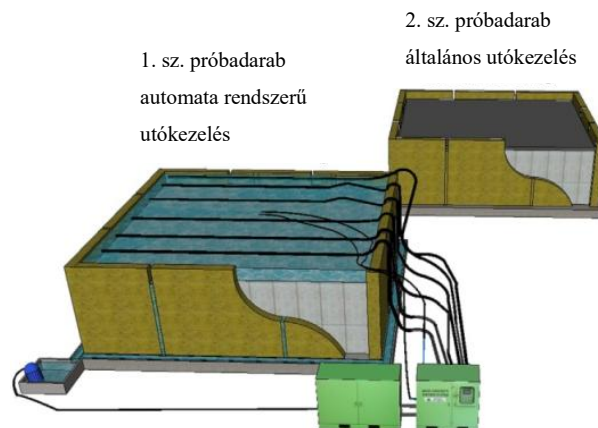


10. ábra: Feszültségeloszlás a falszerkezetben [13]

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. 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 [19, 37, 39, 40].

Az utókezelés fentebb említett módszere mellett Ju-Hyung Ha és mtsai. [41] még a csővezetékes hűtést (pl.: nitrogén hűtőfolyadékkal), a párazáró filmréteg alkalmazását vagy

a hagyományos felszíni vízűtést javasolják. A teszthez épített modell szélessége 3 m, magassága 2 m, hossza pedig 5 m volt.



11. ábra: Az 1.sz próbadarab automata utókezelő rendszerrel és 2. számú általános utókezeléssel ellátott próbadarab egyszerűsített modelljei [41]

Az eredményekről elmondható, hogy a 1. ábrán látható automatizált rendszer segítségével a beton belseje és felszíne között kialakuló hőmérsékletkülönbség nem haladta meg a 20 °C-ot az 1. sz. próbadarab esetében. A 2. sz. próbadarabnál az általános utókezelés esetén a hőmérsékletkülönbség maximuma 29 °C lett. 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 [41]

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 hőmérséklet szabályozó szerepe is van, mert így a maximális hőfeszültség csökkenthető. A gyakorlatban a szakaszos betonozás minimum három nap elteltével folytatható, így elkerülhető a beton kiszáradása, az esetleges repedések kialakulása és elősegíthető a cement hidratációja [19].

T.A. Do és mtsai. a térfogat-felület arány és a hidratációs hő hatását vizsgálták az előregyártott beton szegmentált dobozgerendák korai szakaszában. A szerkezet

geometriája és annak a kialakuló hőmérsékletekre gyakorolt hatása volt a vizsgálatok központjában [42].

Ezen állításokkal ellentétben Schutter és munkatársa szerint nem minden esetben tanácsos a szakaszos betonöntés alkalmazása. A szerzők egy antwerpeni kikötő rakpart falát vizsgálták végeelem-módszerrel. A különleges, J-alakú geometriájú rakpart elemet, (magassága 30 méter, legszélesebb pontján 20 méter vastagságú) tömegbetonból tervezték megépíteni, acélbetét megerősítés nélkül. A FEM modellezés segítségével két esetet vizsgáltak a szerzők. Az egyik esetben hat betonöntési szakaszt, és a szakaszok között 3 nap, egy hét és két hét várakozási időt tételtek fel. A szimuláció során kiderült, hogy a még irreálisan hosszú két hét várakozási idő esetén is túl magas az előzőekben megépített rész hőmérséklete, így a kialakuló hősokk és az abból származó feszültségek a szerkezet károsodásához vezetnének. A másik esetben a modellt egyrétegű kiöntéssel szimulálták. Az eredmények szerint, a 200 kg/m^3 -es cementtartalom és az 5°C -os beton bedolgozási hőmérséklet mellett a repedések elkerülhetők [43]. A szimuláció eredménye azt igazolta, hogy a szakaszos betonozás ennél a geometriánál és peremfeltételnél repedésképződéshez vezet. Ez az eredmény ellentmond annak, hogy a szakaszos betonozással elkerülhetőek a repedések, viszont pontosan azt igazolja, 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 [43].

A szakaszos építés és az illesztések hatását vizsgálták Feng Lin és munkatársai. 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. A megépített modell mellett a FEM elemzésre is sor került. A szerkezet vasbeton falainak vastagsága 900 mm volt és hasonló szegmensekből álltak. A laboratóriumi vizsgálat egy tipikus szegmensre vonatkozott 1:4 méretarányban, vagyis a vizsgált vasbeton fal vastagsága 225 mm volt. A vasbeton falminta végeire két vasbeton tömböt helyeztek el, hogy szimulálják a szerkezet többi része által okozott elmozdulás-korlátozást. A 165 napig tartó kísérlet során a korábban említett mechanikai tulajdonságok mindegyikének vizsgálatára sor került. 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 [44]. 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 hőmérséklet-különbségnek kell kiemelt fontosságot tulajdonítani.

1.3 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 hőmérséklet-különbség. Áttekintettem a gyakorlati tapasztalatok és a kutatások eredményei alapján a hőmérséklet-különbség kialakulását befolyásoló fontos tényezőket. 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. A maximális hőmérséklet mérése kulcsfontosságú szerepet játszott a tömegbetonok kutatásában, amelynek meghatározására több vizsgálati módszert is kidolgoztak az elmúlt évtizedekben.

1.3.1 A cementhidratációs hő mérése

A cement hidratációs hőjének mérése történhet statikus módszerrel, amely oldáshő mérésen alapul. Ez 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].

Az oldáshő méréssel ellentétben a kaloriméter fajtájától függetlenül a hidratációs hő közvetlenül követhető a cement és a víz találkozásának pillanatától kezdve, kaloriméteres méréssel. A kaloriméterek három részből állnak: a reakcióteréből, a külső környezetből, valamint a két térrészt elválasztó tartályból. Ha a reakcióteret és a tartályt rendszernek tekintjük, akkor a kalorimétereket működési elvük szerint három csoportba sorolhatjuk: adiabatikus, izotermikus és hőáramlásos kaloriméterek. Mindhárom módszer közelítő

eredményeket ad a hőfejlődés mértékét illetően. A hőáramlásos módszer hátránya, hogy nem szimulálja a betonszerkezetben lévő valós állapotokat, az izotermikus módszer pedig a tartály hatás okán tekinthető pontatlannak. Leginkább az adiabatikus (környezettől elzárt) módszer alkalmazható megbízható laboratóriumi kísérletek esetében [4].

A hidratációs hő minden cement típus esetében jellemző adat, mérése kaloriméterrel valósítható meg. Több kutatás is irányult arra, hogy milyen berendezéssel célszerű elvégezni a vizsgálatot, amelyet egyébként szabvány is rögzít.

A legegyszerűbb kaloriméterek közé tartoznak az úgynevezett „kávéscsésze” típusú készülékek, amelyek elsősorban oktatási célokat szolgálnak, és gyors, kvalitatív mérésekre alkalmasak. Ezek jellemzően nem adiabatikus, hanem nyitott rendszerű készülékek, hőveszteség viszonylag nagy és a minta és a környezet között nem zárható ki a hőcsere. A kávéscsésze típusú kaloriméterek egyszerűségük és alacsony költségük miatt népszerűek az ipari és helyszíni cementvizsgálatokban, különösen előzetes, gyors értékelésekhez [31, 33, 45, 46]. A CP Tech Center fejlesztése egy egyszerű és gyors kalorimetrikus mérőrendszert mutatott be, amely alkalmas a betonkeverékek hőfejlődésének figyelemmel kísérésére akár terepi körülmények között is [45]. John C. O’C. Young [47] művében kiemeli, hogy az egyedi fejlesztésű „coffee cup” típusú kaloriméter szigetelése megfelelő labormérések elvégzéséhez. A szakirodalmat tekintve vagy szabványos méréseket végeznek [48] szerint, vagy pedig egyedi fejlesztésű kalorimétereket [49-51] alkalmaznak. Hasonló rendszert alkalmaztak Šiler és munkatársai is, amikor különböző adalékanyagok – például cinkionok és hamu – cementhidratációra gyakorolt hatását vizsgálták [52].

Gibbon és mtsai [53] a beton hőtermelő folyamatát laboratóriumi méréssorozattal vizsgálták, amelyhez egyedi fejlesztésű kalorimétert használtak. Az így kapott eredményeket végelelemes modell bemeneteként alkalmazták.

J. Young [47] cikkében bemutatja a coffee cup kaloriméter sok esetben elhanyagolt hőmérséklet kompenzációs modelljének jelentőségét és a szigetelés hőtani tulajdonságainak befolyásoló hatását féladiabatikus mérés megvalósítása esetén.

Lim Chang-keun és munkatársai cikkükben rámutattak arra, hogy a repedésveszélyt végelelem-modellezéssel költséghatékonyan lehet meghatározni. Tanulmányukban adiabatikus és szemiadiabatikus modelleket alkalmaznak a beton repedésérzékenységének vizsgálatára [54].

A félig adiabatikus mérőrendszerek hasonló elven működnek, azonban egyszerűbb műszaki kialakításuk miatt szigetelésük nem tökéletes. Ezt a módszert széles körben alkalmazzák például a cementhabarcsok hidratációjának vizsgálatára az MSZ EN 196-9

szabvány alapján. A módszer előnye, hogy realisabban ábrázolja a cementek hőfejlődését nagy térfogatú szerkezetekben, és laboratóriumi körülmények között is kiválóan reprodukálható [55].

A félig adiabatikus kaloriméterek olyan kompromisszumos megoldást jelentenek, amely – a teljesen adiabatikus rendszerekhez képest – egyszerűbb és költséghatékonyabb, ugyanakkor jelentősen csökkenti a környezeti hőveszteséget. Ez különösen előnyös a cementalapú anyagok vizsgálata során, ahol a lassú hőfejlődés megbízható méréséhez stabil környezeti feltételekre van szükség [56, 57].

Az adiabatikus kaloriméterek alkalmazásának célja, hogy minimális hőveszteség mellett természetes módon kövessék nyomon a rendszerben keletkező hő hatására bekövetkező hőmérséklet-változásokat. A környezet és a minta hőmérsékletét szinte azonos szinten tartják, így a mért hőmérséklet-változás egyenesen arányos a keletkező hőmennyiséggel [58].

Hazánkban a cement hidratációs hőjének vizsgálatát és berendezés igényét az MSZ EN 196-9:2010 szabvány [48] írja le. A szabvány féladiabatikus módszert és a hozzá tartozó berendezés jellemzőit mutatja be.

1.3.2 A tömegbeton szerkezetben kialakuló hőmérsékletek mérése

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 és termoelemes hőmérők.

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

Az **ellenállás hőmérők** a fémek ohmikus ellenállás-változásán alapuló hőmérséklet-változást mérik [4]. A leggyakrabban alkalmazott ellenálláshőmérő platina alapú, melyet szabványok definiálnak (PT100 esetében az ellenállás 0 °C-n 100 ohm, két pontossági osztályban: A, B) [40].

C.-Y. Chang kontroll érzékelőként alkalmazott PT100 hőmérőt, és egy újszerű RFIC (Radio Frequency Integrated Circuit) érzékelő kidolgozásán dolgoztak, mellyel a betonban a hőmérséklet és nedvességtartalom mérésére keresték a lehetőséget. A PT100 gyakran használt ipari hőmérsékletek mérésére, széles mérési tartománya ($-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $+640\text{ }^{\circ}\text{C}$) és $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -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. Ez a hiba okozta, hogy a fém érzékelő nem valós eredményeket szolgáltatott a beton hőmérsékletének változásáról [60].

A **termoelemes hőmérőket** gyakran alkalmazzák a betonszerkezetek belső hőmérsékletének 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 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 munkatársak a korszerű és gondosan kifejlesztett rendszernek köszönhetően megállapíthatták, hogy a maximálisan kialakult $18,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os hőmérséklet-különbség miatt nem volt szükség különleges beavatkozásra. A mérés időtartama 12000 perc (8,3 nap) volt [3].

A termoelemek (aktív érzékelők) használatának előnye, egyrészt az érzékelő közel lineáris karakterisztikája, továbbá az, hogy nincs szükség 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 megy végbe. Amennyiben ezen hidratációs hő mérése a cél, a termoelem alkalmasnak bizonyul. Megnehezíti viszont a munkát a hidegpont kialakítása (összehasonlító pont) és a mérés időtartama alatt a folyamatos fenntartása/védelme.

1.4 Számítási módszerek a VEM és 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 a mechanikai viselkedés numerikus vizsgálatára több diszkrét elemes modellt alkottak meg.

"Minden diszkrét elemes modell különálló elemekből és az az elemek érintkezésével létrejövő kapcsolatokból áll." [61]. 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 anyagjellemző paraméterek megadása; a terhelési folyamatok szimulálása [61].

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 Element Method) eljárás lehetővé teszi a betonok belsejében lejátszódó termodinamikai és mechanikai folyamatok egyidejű modellezését.

Szakirodalmi kutatásom során a FEM (Finite Element Modelling) eljárás alkalmazását találtam leggyakoribb megoldásnak a betonok fizikai, mechanikai tulajdonságainak meghatározása eszközül [31, 62, 63]. 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 [38]. A FEM modell esetében a kiválasztott vizsgálandó paraméterek és a kezdeti peremfeltételek megadása mellett a betont több esetben is lineárisan izotróp anyagként kezelik [44]. Ezzel ellentétben Klemczak szerint a tömegbetonok esetében a különböző tulajdonságokkal rendelkező – anizotróp mezők kialakítása szükséges a modellezés pontossága érdekében [14]. Ez a megállapítás viszont az anyag, azaz a beton anizotróp viselkedését feltételezi.

A FEM számítási eljárásban ért el eredményeket Zhoujiaozi Yu szerzőtársaival, ők háromdimenziós numerikus felületmódszert dolgoztak ki [64]. A végeelem-módszer (FEM) a leggyakrabban alkalmazott módszer a tömegbeton szerkezetek hőfeszüléseinek elemzésére. Azonban olyan tömegbeton szerkezetek esetében, amelyek összetettek, hosszú építési idővel járnak, vagy több rétegre és tömbökre vannak felosztva, a FEM olyan kihívásokkal szembesül, mint a jelentős számítási terhelés és a bonyolult előfeldolgozás.

Ehhez képest a numerikus sokaság módszer (NMM) nagyobb rugalmasságot kínál a háló generálásában, könnyebb skálázhatóságot és adaptív elemzési képességeket [64-67].

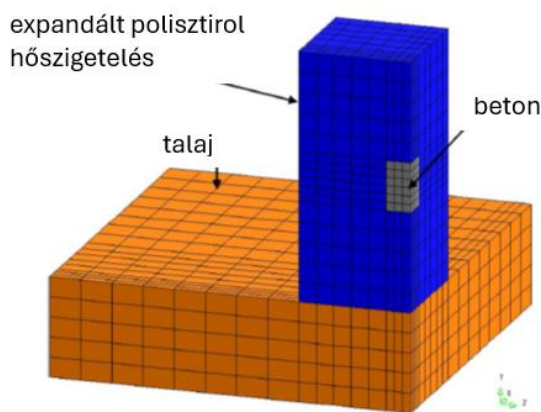
Kiegészítésként meg kívánom jegyezni, hogy a modell izotróp vagy anizotróp voltának megítélését véleményem szerint a betontest dimenziói (méretei, térfogata), elhelyezési módja (alap vagy felmenő fal) is befolyásolja.

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.

1.5 A tömegbeton szerkezetek készítésekor felmerülő leggyakoribb problémák

A beton próbatestek méretei

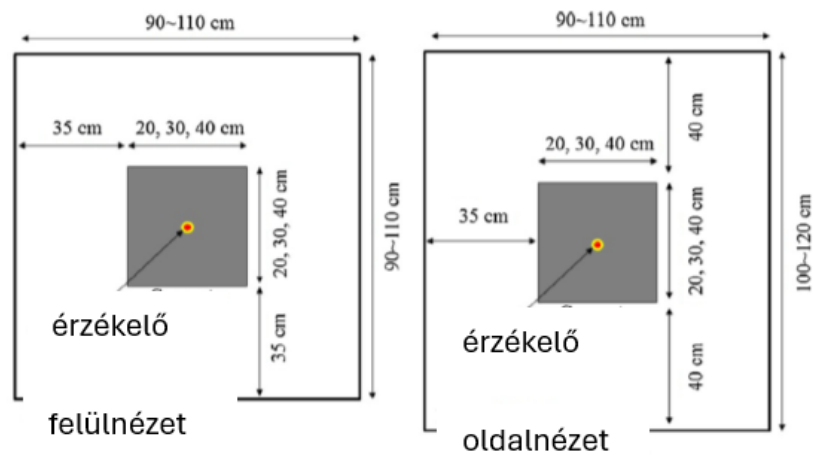
Chang – Keun és munkatársai [68] a végelem modellezést ajánlják a repedési hajlam feltérképezéséhez, amely költséghatékony megoldást kínál a tömegbeton szerkezetben várhatóan kialakuló hőmérsékletek meghatározására.



12. ábra: A féladiabatikus modell [68]

A szerzők cikkükben bemutatják egy adiabatikus és féladiabatikus modell (12. ábra) végeselemes analízis eredményét. Az általuk kifejlesztett új módszert valós modellen

validálták. A végeselemes modellezés során különböző méretű beton próbatestet definiáltak és ezeket jelentősen nagyobb – 35 illetve 40 cm vastag - hőszigetelő réteggel látták el. A konstrukciót a méretekkel a 13. ábra szemlélteti.



13. ábra: A különböző méretű próbatestek és a hőszigetelő réteg méretei [68]

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. A szerzők cikkükben bemutatott eredményei meggyőzőek, de ahogy ők sem, úgy más szerzők [37, 68] sem indokolták, hogy a választott beton próbatest mérete miért éppen ekkora volt.

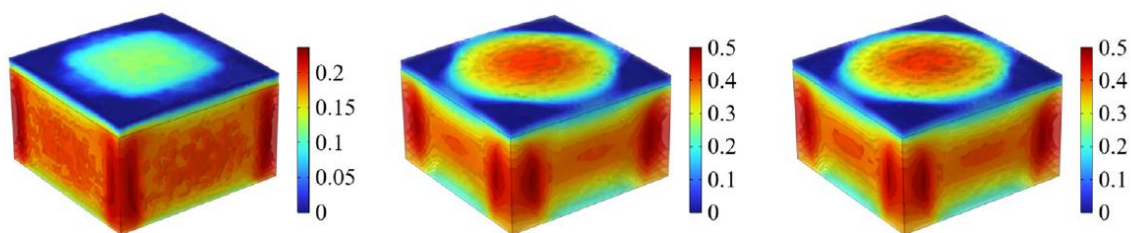
Guowen Sun és munkatársai tömegbeton szerkezet hőmérsékleteinek alakulását vizsgálta végeselemes analízissel, majd validálta eredményeit egy konkrét kísérlettel.



14. ábra: A zsaluzatban elhelyezkedő beton próbatest a talajra elválasztó réteg nélkül telepítve [34]

A vizsgált betontest $1.5 \times 1.5 \times 0.8$ m nagyságú volt, de cikkükben a szerzők nem magyarázzák a választott geometriát. A kísérletről készült képen 14. ábra jól látható, hogy a beton zsaluzata közvetlenül a talajra lett telepítve, amelynek a hőelvonó képességét nem vették figyelembe a szerzők [34].

A végeselemes analízis során kapott eredményeket a szerzők a 6. órában, 1 napos illetve 7 napos korban ábrázolták, ezt mutatja be az 15. ábra.



15. ábra: A végeselemes analízis során kapott hőmérsékleti eredmények a 6. órában, 1 napos és 7 napos beton esetén [34]

Megfigyelve a hőmérséklet alakulását a próbatestben egyértelműen kiderül, hogy a 0,8 méter magasság közel $1/3$ -án a talaj hőelvonó hatása érvényesül, amely a képeken kékeszöldes színnel jelenik meg [34].

Ahogy a fenti cikk is bizonyítja és a szakirodalmi kutatásom során legtöbb esetben kiderült, hogy a próbatest mérete csak bemeneti paraméterként jelent meg, de annak méretére való magyarázatot nem találtam. Ennek okán az egyik kutatási célnak 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 végeselemes analízis során. Ennek okán a kérdés megválaszolása köré építtem vizsgálataimat.

A vasbeton és a betonacélt nem tartalmazó szerkezetek hőmérsékleteinek alakulása

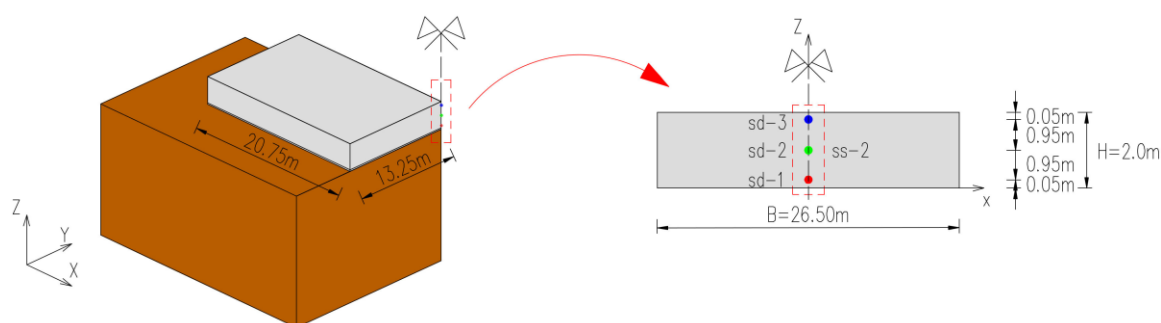
B. Klemczak cikkében vasbeton tartály és vasbeton híd-elem repedéseinek okait vizsgálja. Kiemeli a megfelelő anyagválasztás fontosságát, hiszen sokszor a nagyobb szilárdságot biztosító CEM I típusú kötőanyagot írja elő a szabályozás, figyelmen kívül hagyva a magas kötési hőfejlődést. Az előírások szerinti betonkeverék használata nagyobb repedéskockázatot jelent [14].

X. Song. és mtsai. 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 [69].

E.N. Ivanov és mtsai. tanulmányukban egy atomerőmű alaptestének és vasbeton falának hőmérsékleti viszonyaira és hőterheléses állapotára vonatkozó numerikus vizsgálataik eredményeit mutatják be az építési időszakra vonatkoztatva. Ebben a konkrét szerkezetbetonozási esetben kimutatták, hogy ha az I. D. Zaporozhets korrekciós függvényt beépítik a számítási programba, nincs szükség hőszigetelésre. A közvetlen gazdasági hatás, valamint a kivitelezési idő csökkenésével járó közvetett hatás lehetővé teszi a kivitelezési költségek emelkedésének elkerülését. Javasolják a kidolgozott módszertan alkalmazását a tömör beton és a vasbeton szerkezetek hőre való repedésállóságának gyakorlati számításai során a kivitelezési időszak alatt [70].

Aneta Smolana és mtsai. nagy tömegű $26.5 \times 41.5 \times 2$ m nagyságú beton alaplemez termomechanikai elemzése során az a környezeti hőmérséklet napi ingadozását, a vasbeton szerkezet alatti talaj szükséges kiterjedését és a végeleemes háló méretét és a talaj mélységében kialakuló hőmérsékleteloszlásának alakulását vette figyelembe. A vizsgált geometria negyedét modellezték, ez a végeleemes modell az 16. ábrán látható.



16. ábra: A $26.5 \times 41.5 \times 2$ m nagyságú beton alaplemez negyedmodellje [71]

Szerzők kutatásuk során a zsugorodás feszültségekre gyakorolt hatását, illetve a vasalás, azaz a betonacélok szerepét vizsgálták. Az alkalmazott betonacélok 25 mm átmérőjűek voltak 150 mm-es osztásközzel, 6 cm-es betontakarással. A betontakarás szükségessége betonacélt tartalmazó betonszerkezetek esetén a külső hatások elleni védelmet szolgálja, amely a betonacél korróziót akadályozza meg vagy késlelteti. Szerzők igazolták, hogy a betonacélok jelenléte a repedések szélességét csökkenti [71].

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.

A talaj és a levegő hatása a beton próbatestre

Egyetemleges 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, hanem a betonozás körülményeit is figyelembe kell venni.

M. Azenha [72] és mtsai numerikus modelljük helyességét laboratóriumi kísérletekkel igazolták, melyben a fiatal beton hőfeszültség okozta alakváltozását vizsgálták. Ezen eredményeket figyelembe véve B. Kuriakose [73] és mtsai. dolgozták ki szimulációs modelljüket és elemezték a szakaszos öntés hatását a szerkezet repedésmentességét biztosítandó.

T. Honorio [24] 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 szaluzatok figyelembevétele mellett a fiatal beton mechanikai és hőtani viselkedésének hatását is felhasználták számításaikban.

E.N. Ivanov [70] egy atomerőmű alaplemezésének és falszerkezetének numerikus vizsgálatokor Maninder Pal Singh [74] és munkatársai pedig egy gát műtárgy hideg időben való elemzésekor vette figyelembe a talaj hőelvonó hatását.

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.

Változó környezeti hőmérséklet hatása a tömegbeton szerkezet hőmérsékleti mezőjére

Qingbin Li [75] 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 [76] 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.

Kim et al. [77] tanulmányukban a beton törésjellemzőit vizsgálták a korai szilárdulási szakaszban. Az eredményül kapott paramétereket vége-selemes analízishez használták bemenetként és jellemezték a beton 1-28 napig tartó szilárdulási szakaszát.

Guoqing Wang és mtsi [78] hideg hőmérsékleten és erős szélben és nagy napi hőmérséklet ingadozás mellett vizsgáltak tömegbeton szerkezetet. Megállapították, hogy a szélsébség növekedése csökkenti a beton hőmérsékletét, ugyanakkor növelheti a beton hőmérsékleti maximumán kialakuló húzófeszültséget. Továbbá megállapították, hogy a napi hőmérséklet ingadozás növekedése növeli a kialakuló maximális hőmérsékletet és ez egyben nem kedvez a szerkezet hőstabilitásának. Eredményeikkel igazolták, hogy a napi hőmérséklet ingadozás esetén a betonszerkezet vízszintes felületein és az oldalfalaknál 35-37 %-os húzófeszültség növekedés volt tapasztalható. A leginkább repedésveszélynek kitett részei a szerkezetnek a vízszintes felületek voltak [37, 78, 79].

Yehong Hu és munkatársai két eltérő évszakban nyáron (augusztus) és ősszel (november) vizsgáltak egy építkezést, ahol hasonló geometriával rendelkező tömegbeton szerkezetet készítettek, ugyanazon épületen. A napi hőmérséklet ingadozás figyelembevételével mellett végzett 29 és 16 napon át tartó mérések eredményeiről elmondható, hogy a nyári betonozás esetén az alacsony páratartalom és a frissbeton magas kiindulási hőmérséklete miatt, nagyobb lett a hőmérséklet-különbség a beton belseje és a felszíne között, különösen a vastagabb részekenél. Az ősszel készült betonszerkezet esetén ez a magas hőmérséklet-különbség nem alakult ki. Eredményeikkel igazolták, hogy a nyári időszakban kialakuló magas hőmérséklet-különbségért a nem megfelelően letakart szerkezet gyors párolgása volt a felelős és kiemelték, hogy erre fokozottan figyelni kell a kivitelezéskor [80].

Fentebb bemutatott cikkekből is látható, hogy több kutató foglalkozik a környezeti hőmérséklet befolyásoló hatásával, amely a kötéskor kialakuló betonszerkezet hőmérsékletét elemzi. Főképp a szélsőséges időjárási körülményre vonatkozóan találtam kutatásokat. A kutatások viszont hiányosak arra vonatkozóan, hogy az egy napon belül változó - azaz napi hőmérséklet ingadozás – hogyan hat a kötési folyamatra mérsékelt égövi tömegbeton szerkezetek esetén. Ennek okán terjesztettem ki a kutatásom a változó környezeti hőmérséklet befolyásoló hatását vizsgálандó.

1.6 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 magas hőmérséklet-különbség hatására kialakuló 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 cement minőségétől és mennyiségétől függő hőtermelés esetében, többek közt a hőfejlődés sebességét, a tömegbeton belseje és a felszíne között kialakuló hőmérséklet-különbséget, 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 hőmérséklet-különbség meghatározását.

2. EGYEDI FEJLESZTÉSŰ KALORIMÉTERES MÉRÉS ÉS FEM- ALAPÚ HŐTECHNIKAI MODELLALKOTÁS

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 (6) definiálom:

$$T=f(\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \theta, \kappa, \sigma), \text{ ahol} \quad (6)$$

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 igazolni. Ennek érdekében egy egyedi fejlesztésű kalorimétert terveztem és állítottam össze, amelyben a cementhabarcs minták hőmérséklete mérhető az idő függvényében.

2.1 Egyedi kaloriméter tervezése és összeállítása

A hidratációs hő mérése az MSZ EN 196-9:2010 *Cementvizsgálati módszerek 9. rész: Hidratációs hő. Féladiabatikus módszer* szabvány szerint történik. Céloom egy olyan egyedi fejlesztésű kaloriméter összeállítása volt, mely gazdaságosan, egyidejűleg több minta

mérésére is lehetővé teszi a közel 1 hétig tartó mérések során (adatgyűjtési idő minimalizálás).

A kutatásaim során többnyire a CEM III típusú cementtel végeztem kísérleteimet. A mérésekhez alkalmazott cement hidratációs hőjét ábrázoló függvényt (lásd később 26. ábra) a Duna-Dráva Cement Kft. váci gyárában készült szabványos mérések alapján vettem fel és használtam szimulációk során. A hidratációs hő mértéke cement függő, a további vizsgálatok elvégzéséhez újabb hőfejlődési eredményekre volt szükségem. Az alábbiakban a kifejlesztett féladiabatikus kalorimétert és annak hőtani jellemzőinek meghatározását mutatom be.

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. 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 vízvesztesség 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 4. táblázatban találhatók.

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

4. 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 az 5. táblázatban látható.

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

5. táblázat: Alapanyagok arányos átszámítása

A tömegből és az összetevők sűrűségéből számított térfogatokat a 6. sz. táblázatban tüntettem fel.

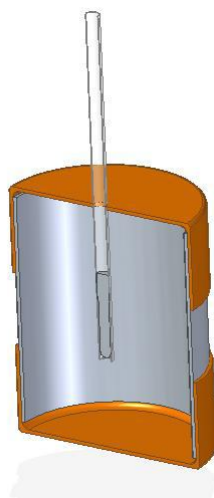
Anyag	Szabványban előírt mennyiség [g]	Sűrűség [g/cm ³]	Térfogat [cm ³]
cement	350	1,50	230
szabványhomok	1050	1,55	670
ionmentesített víz	175	1,00	175
összesen	1575	-	1075

6. 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 cm³ 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

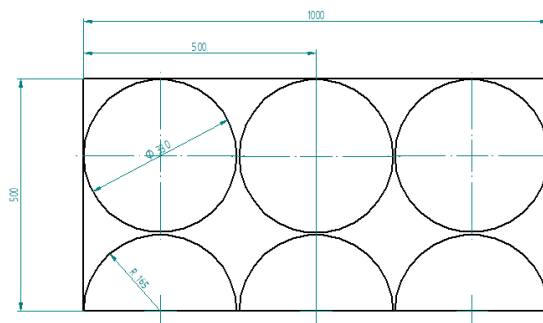
a hővezetést. A felső kupak és a műanyag cső esetében vízhatlan plasztikus tömítőanyagot használtam a keverővíz tartályból való párolgásának megakadályozására.

A habarcstartály végleges konstrukcióját a 17. ábra mutatja be.



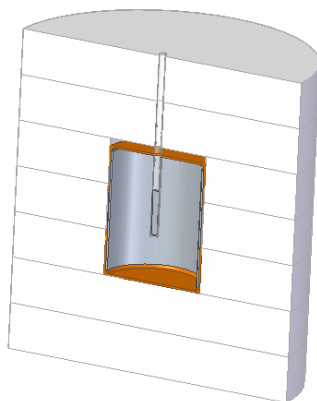
17. ábra: A habarcstartály 3D -s modellje

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 18. ábra szemlélteti.



18. 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 19. ábra szemlélteti.



19. ábra: A kaloriméter metszetben

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 7. táblázat foglalja össze.

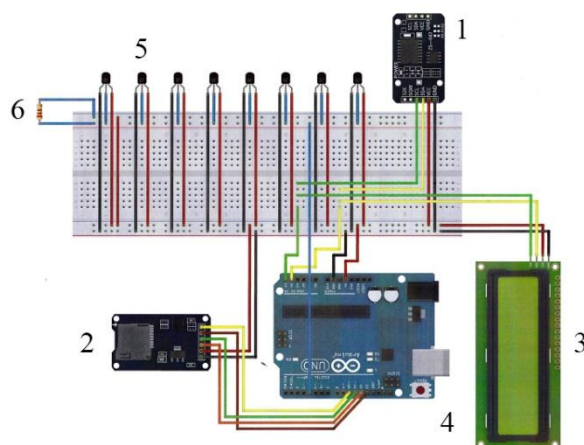
	PT100	DS18B20
Üzemi hőmérséklet	-50°C ... +250°C	-55...125 °C
Mérési pontosság	kalibrálás függvénye	-10 °C és +85 °C között: ± 0.5 °C
Kialakítás	3 vezetékes, rozsdamentes acélhüvely, vízálló	vízálló rozsdamentes acélhüvely
Méret	6 x 50 mm	6 x 50 mm
Feszültség tartomány	-	3...5.5V

7. táblázat: Hőelemek tulajdonságai

A táblázat adatai szerint a DS18B20 pontossága 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.

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 adatgyűjtőkkel 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 hőmérséklet mérésre (megkötött habarcs kaloriméteres vizsgálat) és külső hőmérséklet mérésre.

Az adatgyűjtésre alkalmazott kapcsolás első megoldását a 20. ábra mutatja be.

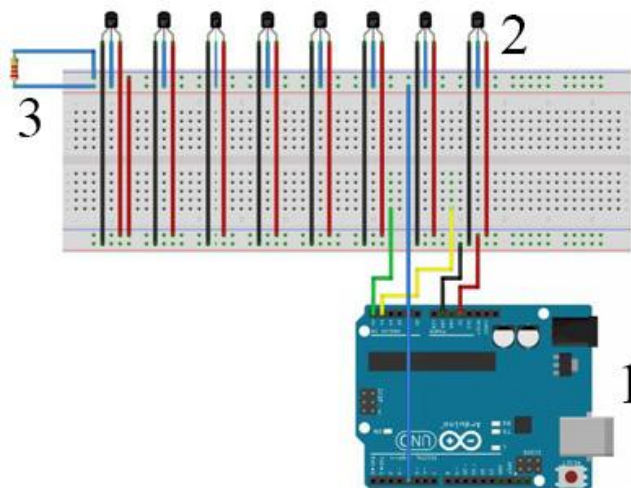


20. ábra: A mérési adatgyűjtő összeállítási rajza

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 hőmérséklet mérő 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 21. ábra szemlélteti. A rendszer részei: 1 – Arduino Uno, 2 - DS18B20-2M típusú hőmérséklet mérő 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.



21. ábra: A végleges mérési adatgyűjtő összeállítási rajza

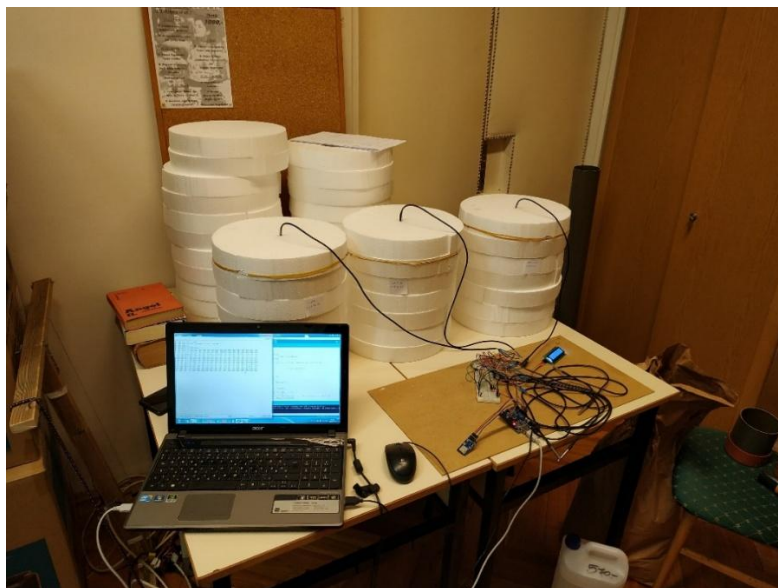
A fenti összeállítással a mérések stabilitása nagymértékben nőtt és a lehetséges 128 szenzorból mérésenként 8 szenzorral 10 másodpercenként 168 órán keresztül sikerült adatokat gyűjteni [56].

A fenti összeállítás alkalmas lett a cementhabarcs minta gyors és gazdaságos kaloriméteres vizsgálatára, ahhoz azonban, hogy a méréseket el lehessen vele végezni a kaloriméter hőtani jellemzőinek meghatározására volt szükség. Ennek részletezését a 3.1 fejezetben ismertetem.

2.2 Az egyedi fejlesztésű kaloriméterben tervezett mérés ismertetése

Az egyedi fejlesztésű kaloriméterben a CEM I és CEM III típusú cementek vizsgálatát kívántam elvégezni. A CIRIA C600 szabvány szerint a beton belseje és a felszíne között kialakuló maximális hőmérséklet-különbséget 19,9 °C-ban maximálható, hogy a szerkezetben ne alakuljon ki a repedéshez vezető veszélyes állapot [81]. A CEM I típusú cementek esetében a hőtermelés majdnem kétszerese a tömegbetonok készítéséhez javasolt CEM III típusú kohósalak cementekhez képest. A kaloriméterben mind a CEM I, mind a

CEM III típusú cementből szabványos habarcskeveréket készítettem és végeztem el a hőmérséklet mérést. A mérési konstrukció összeállítása a 22. ábrán látható.



22. ábra: Az összeállított mérési konstrukció mérés közben

A mérések eredményeit a végelelemes analízis bemeneti paramétereként használtam fel. A számítási modell geometriai méretét 1 m x 1 m x 1m -es kockában definiáltam, ezt implementáltam az ANSYS végelelemes programban. A számítások során a cement fajhőjét 1228 (J/kgK), a hővezetési tényezőjét 3,5 W/(mK), a frissbeton kezdeti hőmérsékletét 20 °C -ra választottam be. A szimuláció keretében a modell hőszigeteléssel ellátott esetét vizsgáltam, így a konvektív hőtranszport együttható értékét 5 W/(m²K)-ben vettem fel. A geometriai modell nyolcad részét vizsgáltam a számolási időt csökkentése érdekében. A modellszámítási eredményeit a 3.2 fejezetben mutatom be.

2.3 FEM-alapú hőtechnikai modellalkotás

Az egyedi fejlesztésű kaloriméterben vizsgált cementhabarcs minták, valamint a Duna Dráva Cement Kft. által készített vizsgálatok eredményeit felhasználva VEM matematikai modell szimuláció sorozatot végeztem a célkitűzésben meghatározott alábbi kérdéskörök tisztázása érdekében.

1. Állandó környezeti hőmérsékletre vonatkozó vizsgálatok:
 - egy 1 méter élhosszúságú, azaz 1 m³ térfogatú beton hőmérséklet-eloszlása 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 hőmérséklet-eloszlása, 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 szimulációs vizsgálatok során alkalmazott beton, cementhabarcs, betonacél, talaj és levegő anyagjellemzőit és a vizsgálatok peremfeltételeit, azaz a hőszigetelésre és az évszakra jellemző szakirodalmi adatokat a 8. táblázat foglalja össze.

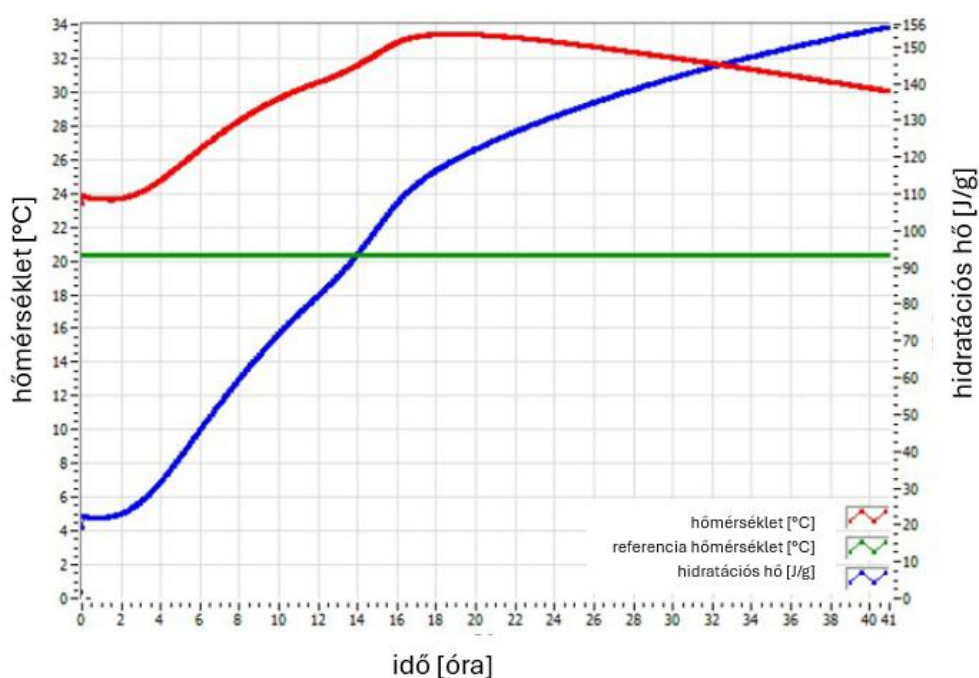
Anyagjellemzők	Beton [49]		Talaj [82]		Betonacél
Fajhő (c_p) [J/(kgK)]	1228		1140		434
Hővezetési tényező (λ) [W/(mK)]	1,28		0,75		60,5
Testsűrűség (ρ_t) [kg/m ³]	2400		1400		7850
Peremfeltételek	Hőszigetelés		Évszak		-
	van	nincs	tél	nyár	-
Konvektív hőtranszport együttható (h) [W/m ² K]	5	30	-	-	-
Környezeti hőmérséklet [°C]	-	-	5	30	-

A betonacél fizikai jellemzői esetén az Ansys programban alapértelmezett értékeket használtam.

8. táblázat: A vizsgálatoknál alkalmazott anyagok anyagjellemzőinek és peremfeltételeinek összefoglalása

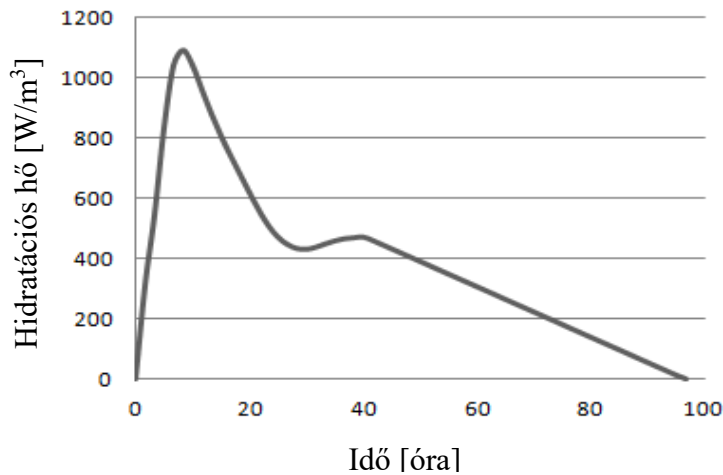
2.3.2 Az analízishez használt cement és az abból készült cementhabarcs tulajdonságai

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. A mérési eredmények a referencia hőmérsékletet, a cementhabarcs minta hőmérsékletét és hidratációs hőjét tartalmazzák. Ezt a mérési eredményt a 23. ábra mutatja be.



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

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 hőfejlés jellemzi. A CEM III B 32,5 N jelű cement hőtermelését a gyártó által készített szabványos kaloriméteres mérése alapján vettem figyelembe. A gyártói mérési eredményekből készült függvény a 24. ábrán látható.



24. 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 végelelemes analízis módszerének bemutatása

A hőmérséklet-eloszlás 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 peremfeltételek 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 (zsuzatba kerülésének időpontjában) 25 °C volt. Az analízis során a 10. táblázatban bemutatott anyagjellemzőket, a CEM III típusú cement hőtermelési függvényét (25. 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 szimuláció 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.

A jelen munkában vizsgált folyamatok lassú, időben elnyúló hővezetési jelenségek, amelyeknél a hőmérsékleti mező térbeli változása sima, lokális ugrásoktól mentes. A kutatás célja a globális hőmérsékleti viselkedés, a maximális és minimális hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet-különbség időbeli alakulásának vizsgálata. Az alkalmazott egyszerű geometriák, homogén anyagi jellemzők és összehasonlító vizsgálati célkitűzés mellett a választott hálózás megfelelő közelítésnek tekinthető.

2.4 A szimulációk során alkalmazott kezdeti- és peremfeltételeinek ismertetése

2.4.1 Különböző méretű beton próbatestek összehasonlító vizsgálata 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. A geometriai modellt, azaz a vizsgált térfogatot különböző élhosszúságú kockán vettem fel. A betonszerkezet különböző méreteit a 9. táblázat foglalja össze [59].

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

9. táblázat: A szimulációnál alkalmazott betonszerkezet különböző méretei

A szimuláció során az alábbi kezdeti- és peremfeltételeket alkalmaztam:

- 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 [61].

A fenti kezdeti- és peremfeltételekkel elvégzett szimuláció eredményeit a 3.3 fejezetben ismertetem.

2.4.2 Az 1 m³-es beton próbatest hőmérsékleteinek vizsgálata CEM III típusú cement használata esetén

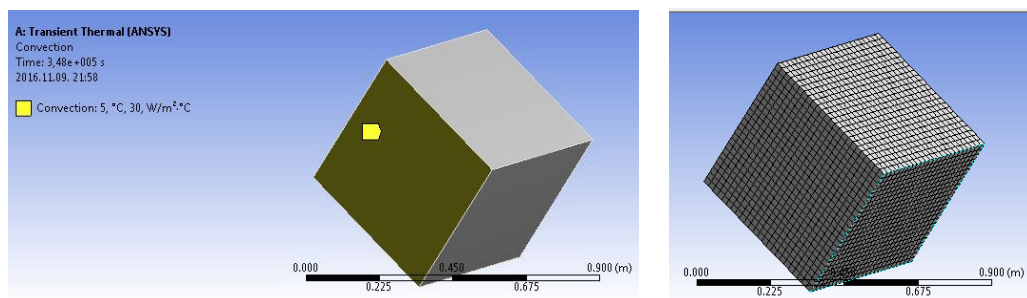
A szimulációhoz szükséges teljes faktoros kísérletterv meghatározásakor figyelembe vettem a gyakorlatban kialakuló lehetséges környezeti hőmérsékleteket, illetve a hőszigetelési megoldások értékeit. A kísérletterv egy 6x6-os mátrixban (10. táblázat) felírható, ahol:

- 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

10. táblázat: A szimulációs kísérletterv faktorok szintjei

A vizsgálat során a 8. táblázatban ismertetett anyagjellemzőkkel, kezdeti- és peremfeltételekkel végeztem el a szimulációt, ahol a téli és nyári betonozás, valamint a hőszigeteléssel ellátott és hőszigetelés nélküli beton próbatest különböző rétegeiben néztem meg a hőmérsékletek alakulását.



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

Az analízis bemeneti paramétereit az alábbiak szerint alakult:

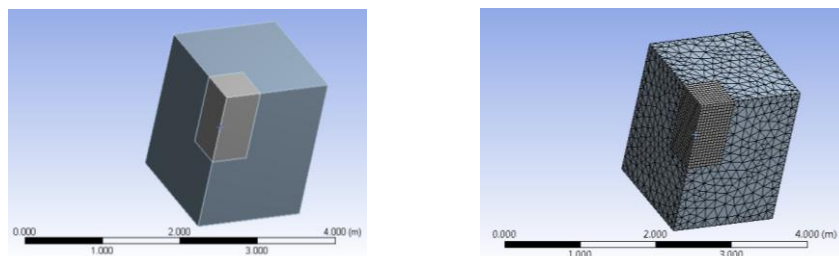
- geometriai modell, azaz a vizsgált térfogat 1 m^3 , amely $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ -es kocka,
- számítási tartomány: vizsgálati térfogatnak a nyolcada került modellezésre, ahol a folytonossági kritériumokat peremfeltételek segítségével definiáltam,
- szilárdtestek és hálózás: 1 db – beton (25. ábra), közepes hálózás (általános elemméret: 4,17 cm)

A fenti kezdeti- és peremfeltételekkel elvégzett szimuláció eredményeit a 3.4 fejezetben ismertetem.

2.4.3 A talaj befolyásoló hatásának vizsgálata

A tömegbeton és a talaj kapcsolatát, azaz a talaj hőelvonó hatását a levegőtől függetlenül vizsgáltam meg ebben a szimulációban. A szimuláció során az alábbi kezdeti- és peremfeltételeket alkalmaztam:

- geometriai modell, azaz a vizsgált
 - o beton térfogat 1 m^3 , amely $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ -es kocka.
 - o 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,



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

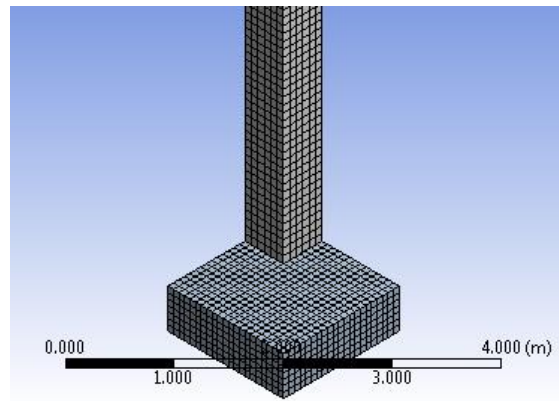
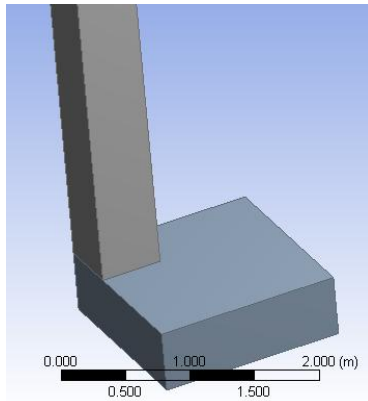
- szilárdtestek és hálózás: 1 db beton és 1 db talaj, ahol a beton és a talaj szilárdtestek felső síkja egy vonalba esik, a szilárdtestek egymáshoz képesti elhelyezkedését a 26 a.) ábra szemlélteti, a hálózást a 26 b.) ábra,
- talaj hőmérséklete a vizsgálat kezdetekor: 25 °C.

A fenti kezdeti- és peremfeltételekkel elvégzett szimuláció eredményeit a 3.5 fejezetben ismertetem.

2.4.4 A talaj és a levegő hőelvonó hatásának vizsgálata

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 m x 1 m alapterületű hasáb, amelynél a külső tényezők (levegő és talaj által elvont hő) hatása egymástól szétválasztva vizsgálható. A geometriai modell alapegységeként az 1m x 1m -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 1,5m x 1,5m -es alapterületű, 0,5 m vastag hasáb, közepes finomságú hálózással (29. ábra). Az analízis során az 1m x 1m -es alapterületű beton modellt 3 ill. 10 m-es magassággal vizsgáltam. A szimuláció során az alábbi kezdeti- és peremfeltételeket alkalmaztam:

- geometriai modell (27. ábra), azaz a vizsgált
 - o beton térfogat 1 m x 1 m alapterületű négyzet 3 méter, illetve 10 méter magas oszlopként
 - o talaj 1,125 m³, amely 1,5 m x 1,5 m x 0,5 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 27. ábra szemlélteti,
- talaj hőmérséklete a vizsgálat kezdetekor: 25 °C.



27. ábra: A modell kiindulási geometriája (bal oldali kép) és hálózása (jobb oldali kép)

A fenti kezdeti- és peremfeltételekkel elvégzett szimuláció eredményeit a 3.6 fejezetben ismertetem.

2.4.5 A változó környezeti hőmérséklet hatásának vizsgálata 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 m^3 , amely $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ -es kocka,
- számítási tartomány: vizsgálati térfogatnak a nyolcada került lemodellezésre, ahol a folytonossági kritériumokat peremfeltételek segítségével definiáltam,
- szilárdtestek és hálózás: 1 db – beton,
- környezeti hőmérséklet: $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ és változó (7) szerint,
- frissbeton bedolgozási hőmérséklete: $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

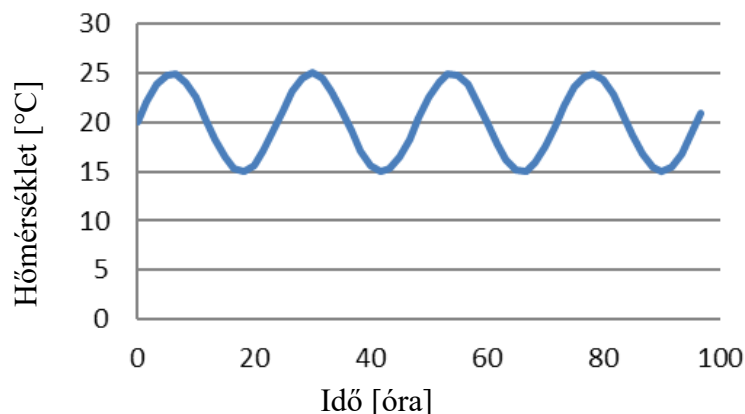
A végeselemes módszer a Fourier-törvényen alapul, beleértve az exoterm hidratációs reakcióból eredő belső hőtermelést. A peremfeltételekre vonatkozóan a szimuláció során két esetet vizsgáltam. Az első esetben a környezeti hőmérséklet $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ a kiinduláskor és az is maradt a vizsgálat során végig. A második esetben a környezeti hőmérséklet $15 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C}$ között változott, nyári betonozást szimulálva. Ez utóbbi esetben a változó környezeti hőmérsékletet az (7) egyenlettel határoztam meg.

$$T(t) = T_{amp} \sin\left(\frac{2\pi}{24} t\right) + T_{avg} \quad (7)$$

ahol

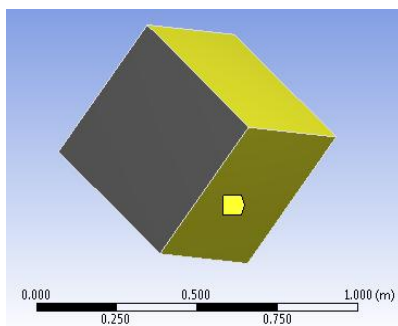
- T_{amp} a hőmérséklet-változás amplitúdója $^\circ\text{C}$ -ban,
- t az idő órában,
- T_{avg} a napi középhőmérséklet $^\circ\text{C}$ -ban.

A periódikus hőmérséklet függvény a 28. ábrán látható, amely a napi hőmérséklet ingadozást reprezentálja.



28. ábra: A környezeti hőmérséklet változása az idő függvényében

A vizsgált modellben (29. ábra) a konvektív hőtranszport együtthatót $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ értéken állandónak tekintettem.

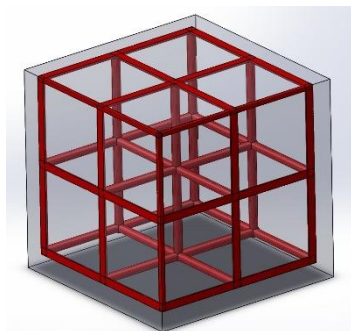


29. ábra: A nyolcad-modell $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ értékű konvektív hőtranszport együttható értékkel a sárgával jelölt felületeken

A fenti kezdeti- és peremfeltételekkel elvégzett szimuláció eredményeit a 3.7 fejezetben ismertetem.

2.4.6 A betonacél befolyásoló hatásának vizsgálata

A vizsgálat során egy vasbeton szerkezet hőmérséklet-eloszlását vizsgáltam, arra keresve a választ, hogy a betontestben kialakuló minimum és maximum hőmérsékletek értéke, ill. hőmérséklet-különbség hogyan változik betonacéllal erősített és betonacél nélküli tömegbetonok esetén.



30. ábra: A betonacélok elhelyezkedése a nyolcadmodellben

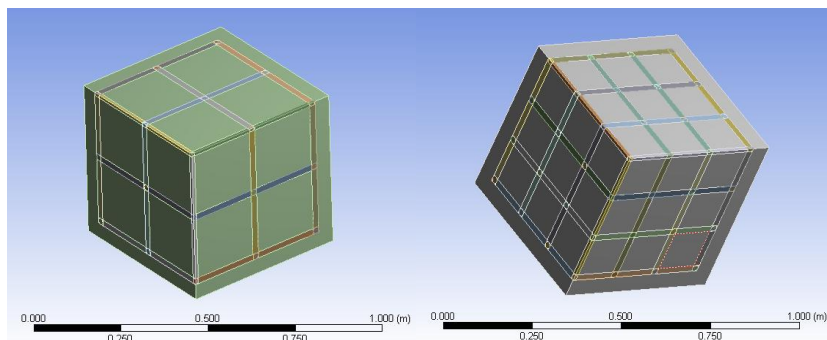
A szimuláció során az alábbi kezdeti- és peremfeltételeket alkalmaztam:

- 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 (30. ábra).

A beton modellt a 2.4.2 fejezet részletesen ismerteti, a vasbeton modellt a 30. ábra mutatja be. A fenti kezdeti- és peremfeltételekkel elvégzett szimuláció eredményeit a 3.8 fejezetben ismertetem.

2.4.7 A betonacél befolyásoló hatásának elemzése eltérő mennyiségű betonacél esetén

A betonacél befolyásoló hatásának vizsgálati eredményei alapján megállapítottam, hogy alacsony környezeti hőmérséklet és magas konvektív hőtranszport együttható esetén is befolyásoló hatással van a modell hőmérséklet-eloszlására 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.

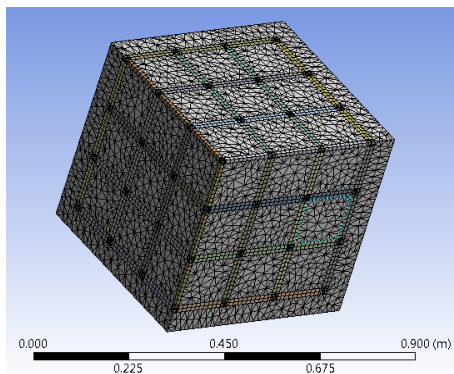


31. ábra: A betonacélok elhelyezkedése a modellben 225 mm és 145 mm osztásközzel

A szimuláció során az alábbi kezdeti- és peremfeltételeket alkalmaztam:

- 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 (31. ábra),
- számítási tartomány: vizsgálati térfogatnak a nyolcad része került modellezésre, ahol a folytonossági kritériumokat peremfeltételek segítségével definiáltam,
- szilárdtestek: 1 db – beton és 1 db betonacél.

A geometriai modell két szilárdtestet tartalmaz - beton és betonacél - azonos finomságú hálózással és peremfeltételekkel. A hálózás méretét tekintve a pontosabb eredmények érdekében finomhálózást (32. ábra) választottam az elemzéshez.



32. ábra: A végelem modell finomhálózása [59].

A fenti kezdeti- és peremfeltételekkel elvégzett szimuláció eredményeit a 3.9 fejezetben ismertetem.

3. EREDMÉNYEK

A fejezet első felében az 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 főfejezet utolsó alfejezete a változó környezeti hőmérséklet befolyásoló hatását mutatja be.

3.1 Az egyedi fejlesztésű kaloriméter hőtani jellemzőinek meghatározása

A berendezés megtervezését és összeállítását követően annak kalibrálására és hőveszteség kompenzálására volt szükség. A 2.1 fejezetben részletezett konstrukcióban a DS18B20 hőelem bevezetése felülről, a minta középebe történt. 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 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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 21. 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 $^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékletű ioncserélt vízzel töltöttem fel. A hőmérséklet felfutási szakaszát nem használtam a kalibrációhoz, így az adatok 55 $^{\circ}\text{C}$ alatti értékeit vettem figyelembe.

A hőmérséklet-változás állandó hőszigetelési vastagság esetén az alábbi differenciálegyenlettel (8) írható fel:

$$C_{v\acute{z}}m \frac{dT}{dt} = -kA(T(t) - T_{k\acute{u}ls\acute{o}}) \quad (8)$$

ahol:

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

$T_{k\acute{u}ls\acute{o}}$: 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 (9) formában határoztam meg:

$$T(t) = (T_0 - T_{k\acute{u}ls\acute{o}})e^{-\frac{kA}{cm}t} + T_{k\acute{u}ls\acute{o}} \quad (9)$$

Ezt követően a hőmérséklet kompenzálására volt szükség a kaloriméter veszteségével. A hőmérséklet mérésekor az első mért hőmérséklet nem szorul kompenzálásra. Minden további hőmérséklet érték a (10) 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:

$$T_{vesztes\acute{e}g}(t = i) = \frac{kA}{c_{ch}m_{ch}}\Delta t \cdot (T_0 - T_{m\acute{e}rt}(t = i - 1)) \quad (10)$$

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:

$$T_{kompenzált}(t = i) = T_{mért}(t = i) + \sum_{t=1}^{t=i-1} T_{veszteség}(t) \quad (11)$$

A kompenzált hőmérsékletet leíró egyenletből (11) a hőtermelés már meghatározható lett. 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.

A kompenzált hőmérsékletből számított hőváltozás a (12) egyenlettel történik.

$$\Delta q(i) = c_{ch} m_{ch} (T_i - T_{i-1}) \quad (12)$$

A teljes folyamatra meghatározott hőtermelés (13) szerint:

$$q(t) = \frac{\sum_{i=1}^t \Delta q_i}{t} \rho_{ch} \quad (13)$$

ahol:

$q(t)$: hőtermelés [W/m³]

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

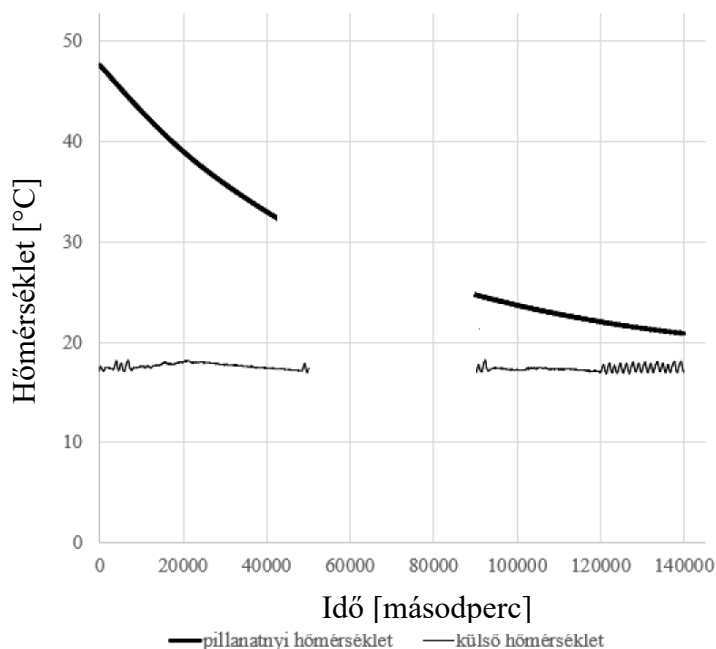
t : eltelt idő [sec]

A teljes folyamatra meghatározott hőtermelés a fenti (13) egyenlettel írható le. Ezt követően a hőérzékelők egymáshoz kalibrálására volt szükség. A hőmérők kalibrálásakor Az S1 azonosítójú szenzorhoz készítettem el a kalibrációt. Szobahőmérsékletre végeztem el a számításokat, amely a mérés közben 19 °C±0,5 °C volt. Az eredményeket a 11. táblázat foglalja össze. Az eltéréseknél az előjelek a referencia értéktől a kisebb vagy nagyobb hőmérsékleteket jelentik. Az átlagos eltérés az 5000 darab mérési eredmény számtani közepéből származtattam. 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 mérés során 6 kalorimétert használtam, 2 hőelemmel pedig a külső hőmérsékletet mértem (ebből az egyik a további méréseknél tartalékként üzemelt, esetleges hőelem meghibásodás esetén a kiértékelhető mérések számát növelte).

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

11. táblázat: Hőelemek egymástól való eltérései

A mérés végét az első kaloriméter belső részének 21 °C alá történő csökkenésének segítségével határoztam meg. A mérés során 14000 mérési pontot rögzítettem (közel 39 óra mérés). A függvény leírására a mérés 1-5000, valamint 9001-14000 sorszámú 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 33. ábra szemlélteti.



33. ábra: Hőmérséklet-idő diagram feldolgozáshoz használt alakja

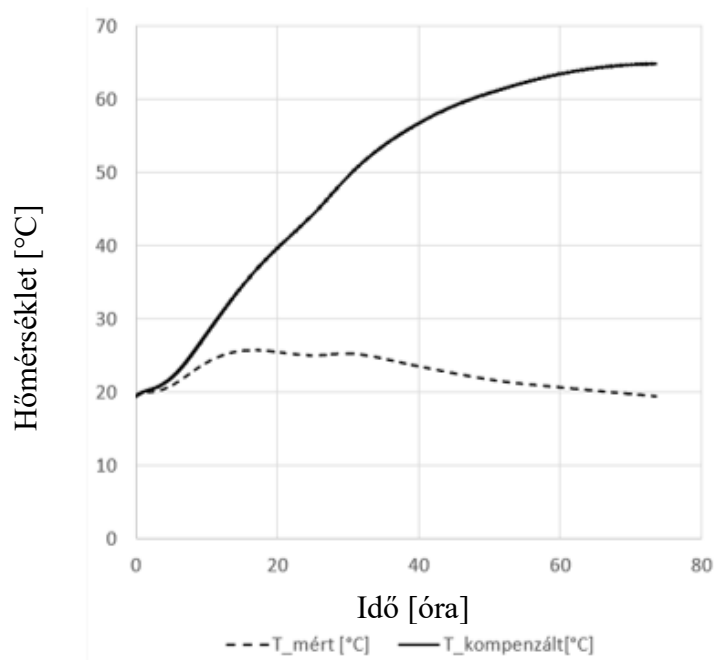
A (10) egyenletben a kA szorzat értékét a felvett hőmérséklet – idő adatokból határoztam meg. A függvényközelítéshez legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztam TRM (Tikhonov Regularization Method) algoritmussal. A közelítéskor a maximális iterációk száma 400 volt. A regressziószámítás eredményeit a 12. 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

12. táblázat: A kA szorzat értékei

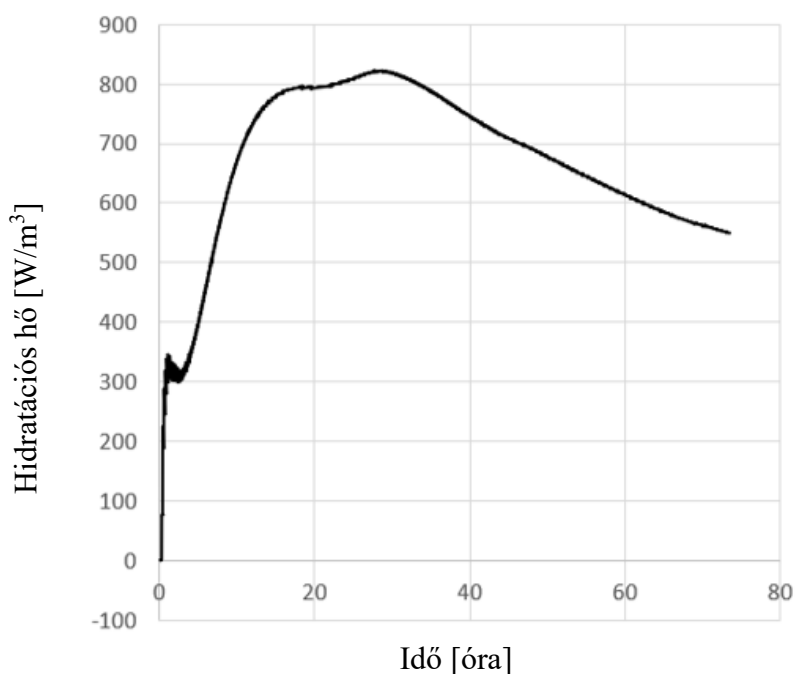
A 12. táblázat értékeiből látható, hogy az illesztett függvény korrelációs együtthatójának négyzete nagyobb 0,99-nél. A kA szorzatból származtatható a hőátbocsátási tényező, de a további számításoknál elegendő a 12. táblázatban ismertetett szorzatok ismerete. A kialakított rendszer általánosan felhasználható, a kereskedelemben kapható adatgyűjtőkhöz képest több bemenettel rendelkezik és a beszerzési költsége alacsony.

A programvezérlésnek köszönhetően tetszőleges időpontokban lehet leolvasni a szenzorok adatait, szükség esetén az egyes hőmérséklet-változások (ugrások) érzékelése esetén sűríteni, adott helyeken pedig ritkítani lehet a mérési pontok számát. Az adatok feldolgozása Matlab segítségével akár nagyszámú (több száz ezres) mérési pont és több bemenet mellett is egyszerűen elvégezhető. A CEM III típusú habarcs vizsgálatához az előkészületeket az [35] 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.



34. ábra: Hőmérséklet- idő diagram CEM III esetén

A vizsgálat így 73,5 óra volt. A szigetelt, de adiabatikus szempontból nem teljesen zárt rendszerben a hőmérséklet-változást a 34. ábra szaggatott vonala jelzi. A diagram folyamatos vonalával a hőmérséklet kompenzációs modell alkalmazásának eredménye látható.

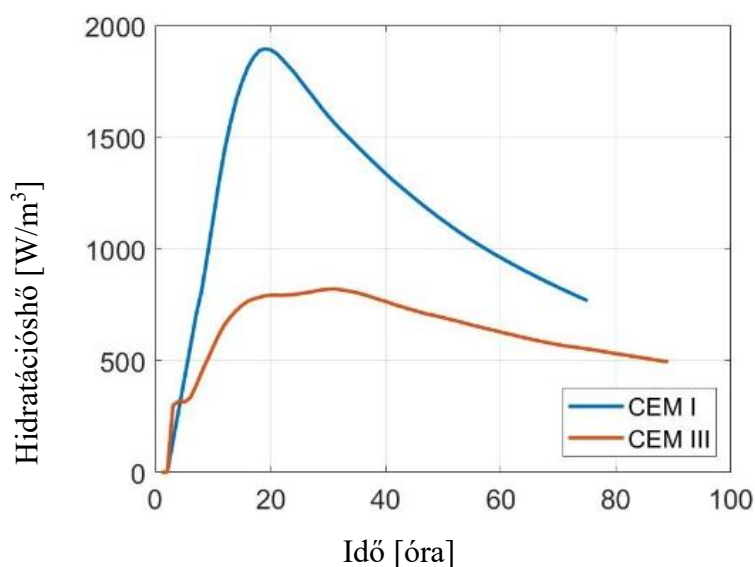


35. ábra: Hőtermelés- idő diagram CEM III esetén

A (11) és (12) szerinti hőtermelést a 35. ábra szemlélteti. A mérés alapján megfigyelhetők az egymásra épülő kémiai folyamatok, valamint az, hogy a szakirodalom által alátámasztott 25-35 óra között van a CEM III típusú cement maximális hőtermelése.

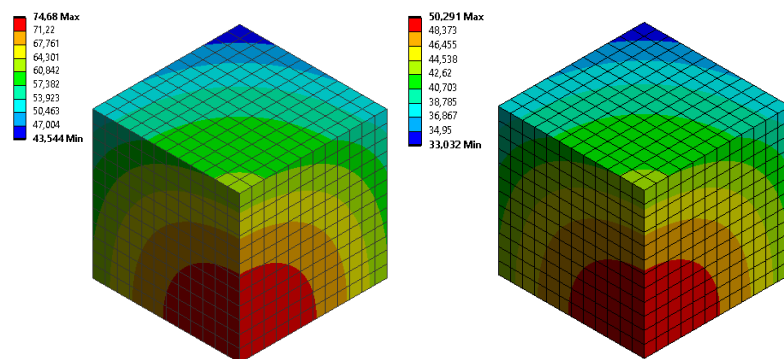
3.2 A CEM I és a CEM III típusú cementek hőtermelésének meghatározása és az eredmények alkalmazása szimuláció során

A 2.1 fejezetben ismertetett egyedi fejlesztésű kaloriméterben a CEM I és CEM III típusú cementek hőmérséklet mérését is elvégeztem. A vizsgálat során a cementhabarcs minták hőmérsékleteit mértem, amelyből a két cementfajta hőtermelését meghatároztam. A kiszámított hidratációs hő a CEM I és CEM III típusú cementekre vonatkoztatva a 36. ábrán került bemutatásra.



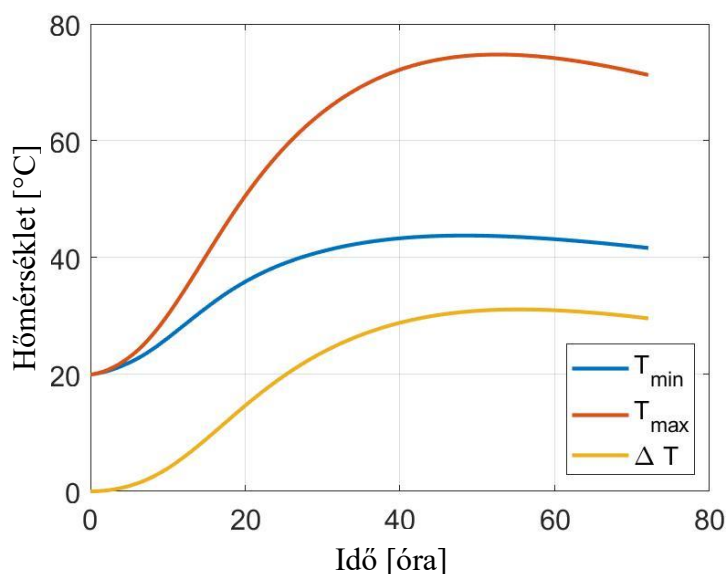
36. ábra: a CEM I és a CEM III hőtermelése

A két cementfajta hőtermelését jellemző függvényt a végeselemes analízis bemeneti paramétereként alkalmaztam, amely szimuláció kezdeti- és peremfeltételeit a 2.2 fejezet utolsó bekezdésében ismertettem. A 37. ábra bal oldalán a CEM I, jobb oldalán a CEM III típusú cementtel végzett szimuláció eredményeit láthatjuk.



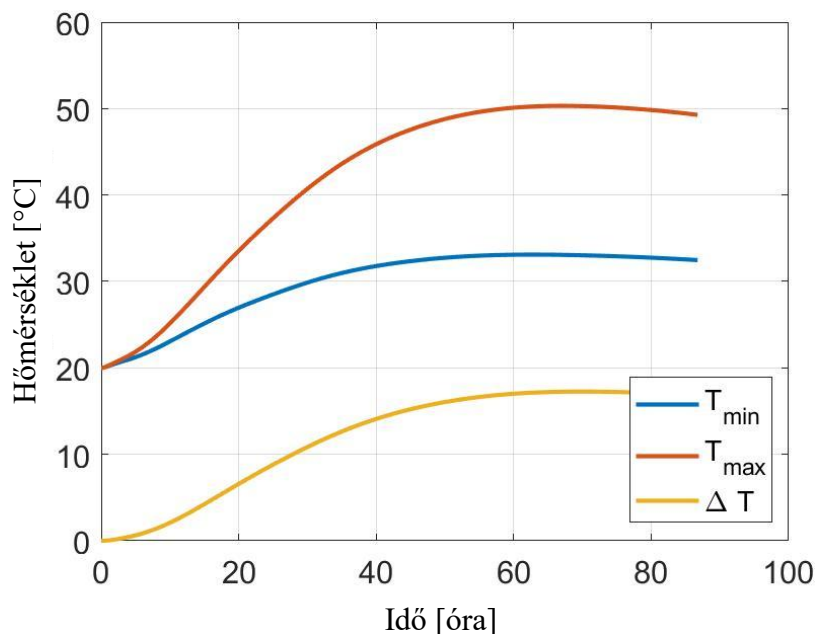
37. ábra: a CEM I (bal oldal) és a CEM III (jobb oldal) típusú cementekkel készült beton modellek hőeloszlása $T=20\text{ °C}$ és $h=5\text{ W/(m}^2\text{K)}$ esetén

Az eredményeken jól látszik, hogy a cement hőtermelése nagy mértékben befolyásolja a betontömb belső részén és a felszínén kialakuló hőmérsékletek alakulását. A CEM I típusú cement esetében a 55,22. órában alakult ki a legnagyobb hőmérséklet-különbség, amely $31,13\text{ °C}$ volt (38. ábra).



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

A CEM III típusú cement esetén a 69,7. órában alakult ki a legnagyobb hőmérséklet-különbség, értéke $17,26\text{ °C}$ volt, a diagram a 39. ábrán látható.



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

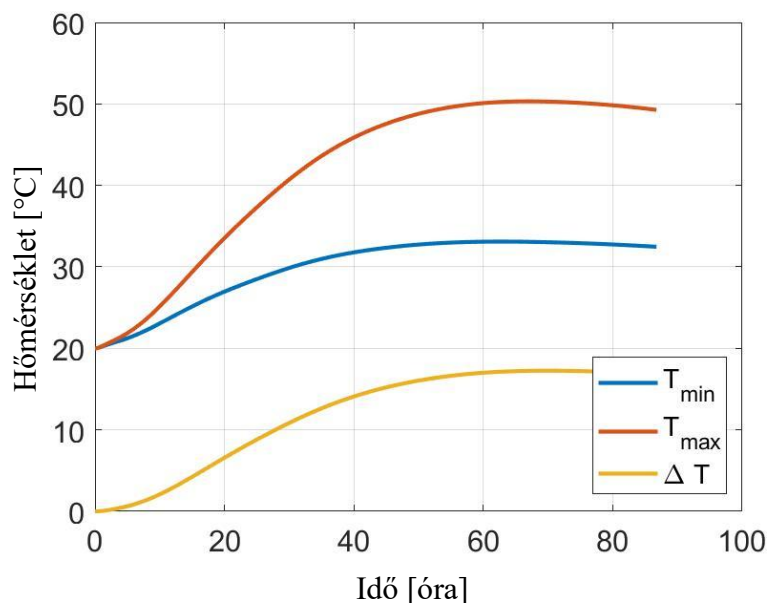
A fenti eredmények is igazolják, hogy a CEM III típusú cement alkalmazása indokolt a tömegbetonok készítésekor, így elkerülhető a szerkezetben kialakuló átmenő repedések létrejötte. A jelen vizsgálat egy nyári betonozást feltételezett (külső hőmérséklet 20 °C), amely esetben a beton zsáuzatán alkalmazott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

3.3 Különböző méretű betontestek összehasonlító vizsgálatának eredményei a CEM III típusú cementből készült beton próbatestek esetén

A 2.4.1 fejezetben leírt feltételek mellett elvégzett szimulációs vizsgálatok eredményeit foglalom össze a jelen fejezetben.

Az elemzés során minden egyes méretű modellt hőszigetelt betonként vizsgáltam, így a $h=5\text{ W/(m}^2\text{K)}$ konvektív hőtranszport együtthatóval számoltam. Az 1 méteres élhosszúságú beton esetén a hőmérséklet-különbség $17,25\text{ °C}$ lett, amely hőmérséklet a 69,7. órában

alakult ki. Az eredményt a 40. ábra szemlélteti, amely diagramon a hőmérsékleti minimumok, maximumok és a hőmérséklet-különbség került ábrázolásra.



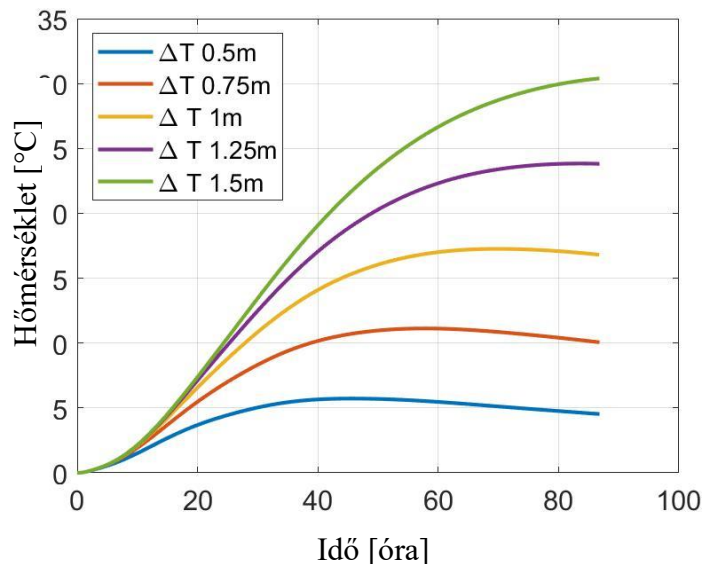
40. ábra: A hőmérséklet-változás az idő függvényében hőszigetelt beton $T=20\text{ °C}$ és $h=5\text{ W/(m}^2\text{K)}$ esetén

A változó méret, ezáltal betontest térfogatának a hőmérsékletre gyakorolt hatását a 13. táblázatban foglalom össze, ebben a maximális hőmérséklet-különbség és az ahhoz tartozó időpont, 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

13. táblázat: A maximális hőmérséklet-különbségek értékei és annak időpontja a modell élhosszainak függvényében

A szimuláció során kapott eredmények diagramja a 41. ábrán láthatóak.

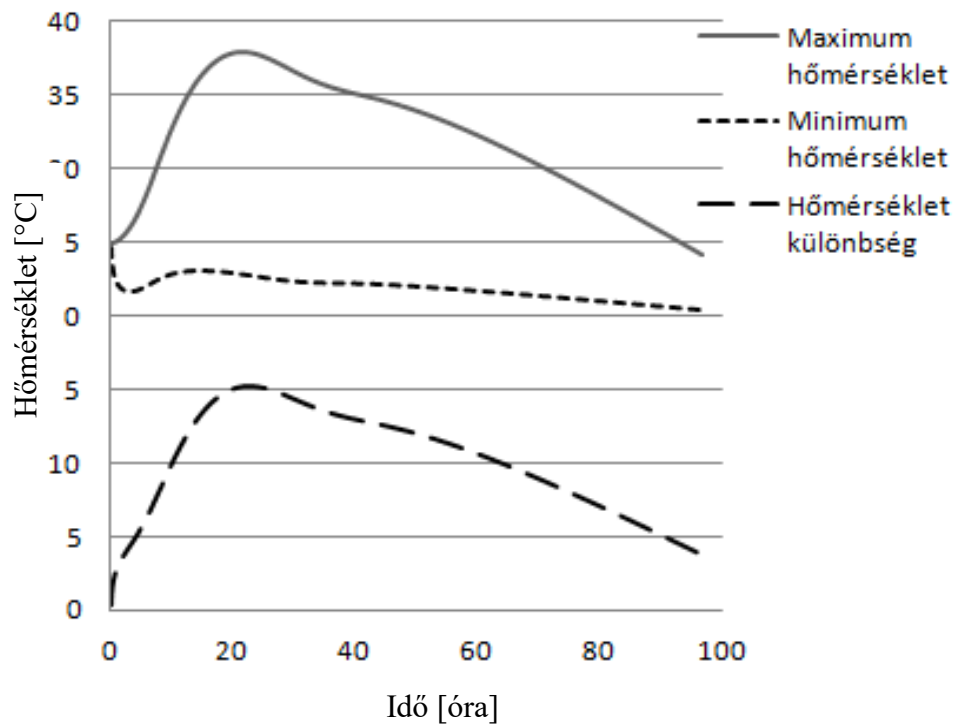


41. ábra: Az élhossznak a hőmérséklet-különbségre gyakorolt hatása $T=20\text{ °C}$ és $h=5\text{ W/(m}^2\text{K)}$ esetén

Az eredmények alapján megállapítható, hogy az azonos kezdeti- és peremfeltételek mellett a maximális hőmérséklet-különbség és annak időpontja a beton modell méretével együtt változik. Az élhossz növekedése nagyobb hőmérséklet-különbséget eredményezett a beton belseje és felszíne között kialakuló maximális és minimális hőmérséklet között.

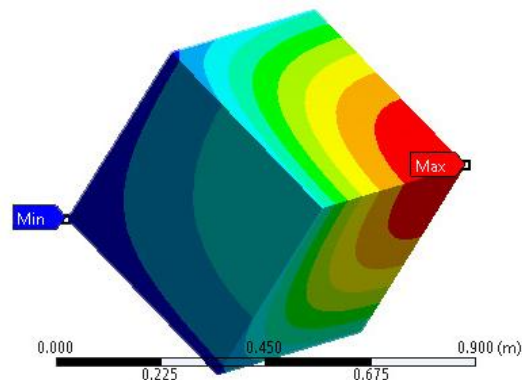
3.4 Az 1 m³-es beton próbatest hőmérsékleteinek vizsgálati eredményei CEM III típusú cement használata esetén

A 2.4.2 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 hőmérséklet-változásokat az idő függvényében a 42. ábra szemlélteti $h=15\text{ W/(m}^2\text{K)}$, $T=20\text{ °C}$ esetén. A ΔT hőmérséklet-különbséget a hőmérsékleti minimumok kevésbé, a maximumok nagymértékben befolyásolják. A hőmérsékleti minimum a kötés kezdetétől számított, jellemzően 5-6. órában, de legkésőbb a 10-12. órában éri el a szélsőértékét, ezután lényegesen nem változik. A hőmérsékleti maximumok viszont a kötés kezdetétől számított 20-22. órában érik el maximumukat és ezt követően közel lineárisan csökkennek.



42. ábra: Hőmérséklet-változás az idő függvényében $h=15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $T=20 \text{ °C}$ esetén

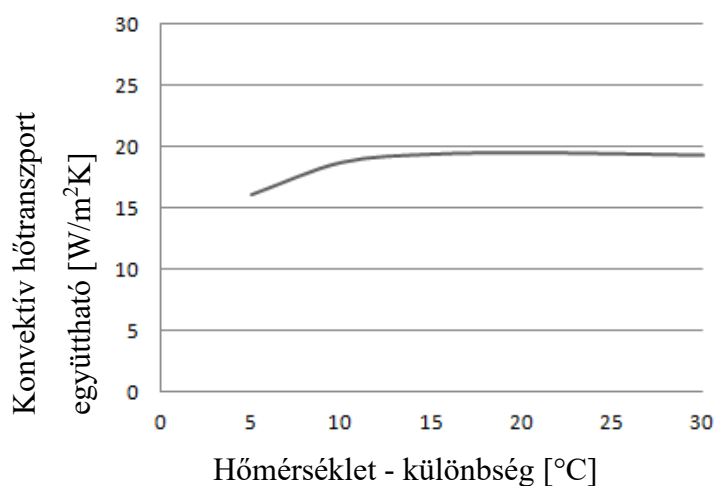
A kiragadott példából is látható, hogy bár a hidratációs hő maximuma (24. ábra) 8 óránál volt, de a repedési hajlamot jellemző maximális hőmérséklet-különbség csak a 25. órában jelentkezett.



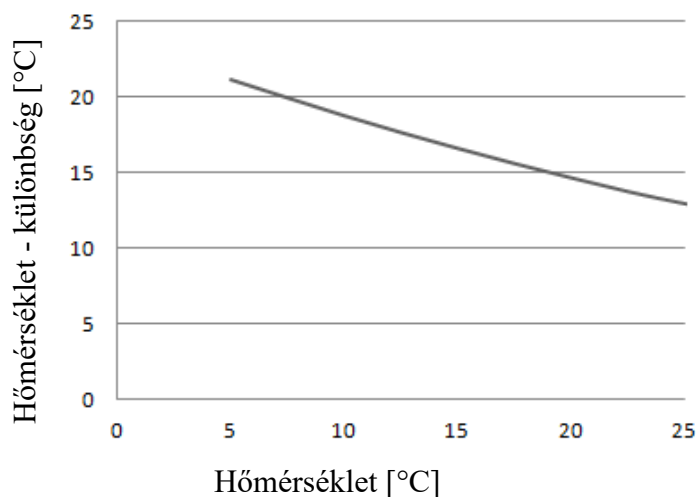
43. ábra: A nyolcad modell szimmetriasíkjában a hőmérséklet eloszlás $h=30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, valamint $T=5 \text{ °C}$ esetén

Az azonos hőmérsékletű frissbeton már a kötése után pár órával a külső lapokon felveszi a közel környezeti hőmérsékletet, így jelentős hőmérséklet-változáson 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 hőmérséklet-változást az 43. ábra szemlélteti. A kísérletterben történő vizsgálat sorozattal arra a kérdésre kerestem a választ, hogy milyen alakú és milyen állandókkal rendelkező célfüggvénnyel tudom jellemezni az előzőekben ismertetett folyamatot. A 12. táblázatban összefoglalt kísérletterv egyes oszlopait és sorait reprezentáló metszések a 44. és 45. ábrán láthatóak.



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



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

A 44. és 45. ábrán bemutatott eredményekből látható, hogy az adott kísérletterben a hőmérséklet-különbség a környezeti hőmérséklettel lineárisan, a konvektív hőtranszport

együtthatóval közelítően másodfokúan változik, így az alábbi függvényalakban (14) kereshető a megoldás (a kereszthatások figyelembevétele nélkül):

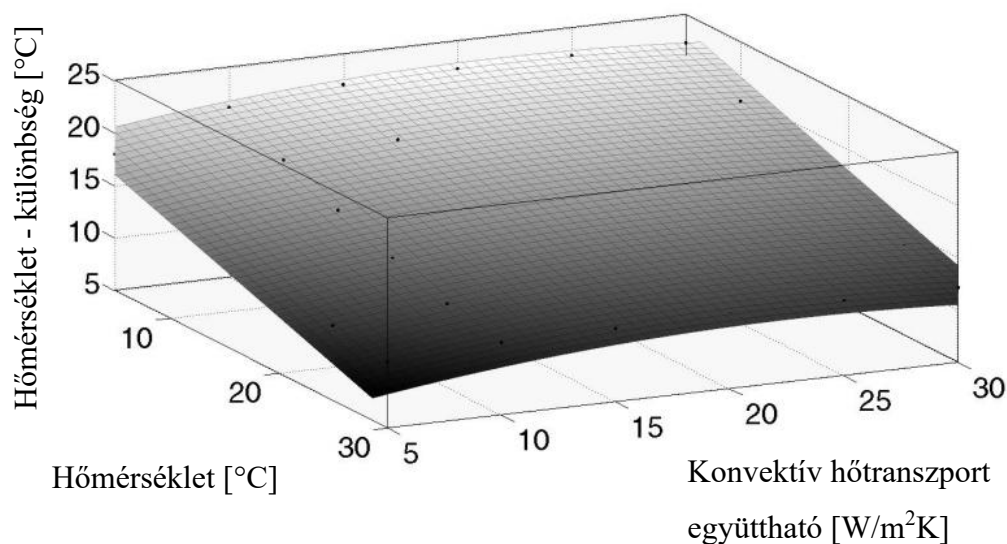
$$\Delta T = a + bT + ch + dh^2 \quad (14)$$

Az összefüggést a Matlab segítségével készítettem. Az érvényességi tartomány a T , azaz hőmérséklet esetén 5 és 30 °C között, valamint a h , azaz konvektív hőtranszport együttható 5 és 30 W/m²K között változik. Az általam végzett vizsgálatoknál az állandók értékeit foglalja össze a 14. táblázat. Az a , b , c , d a regressziós függvény (14) 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]

14. 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 46. ábra szemlélteti.



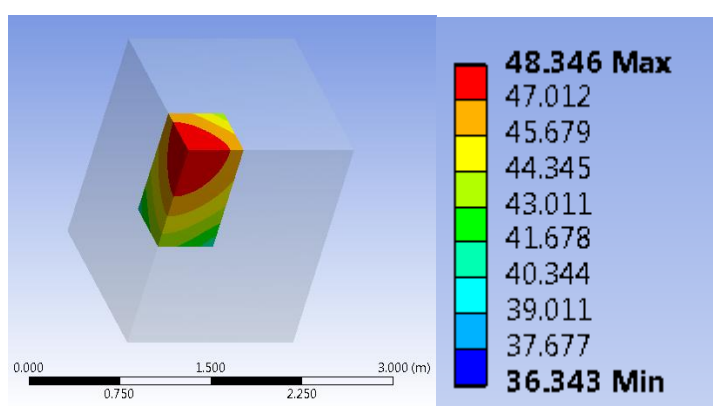
46. ábra: A hőmérséklet-különbség, a hőmérséklet és a konvektív hőtranszport együttható kapcsolata (14) szerint

A kialakított célfüggvény a kísérlettéren 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 többszörös hőmérsékletmérést.

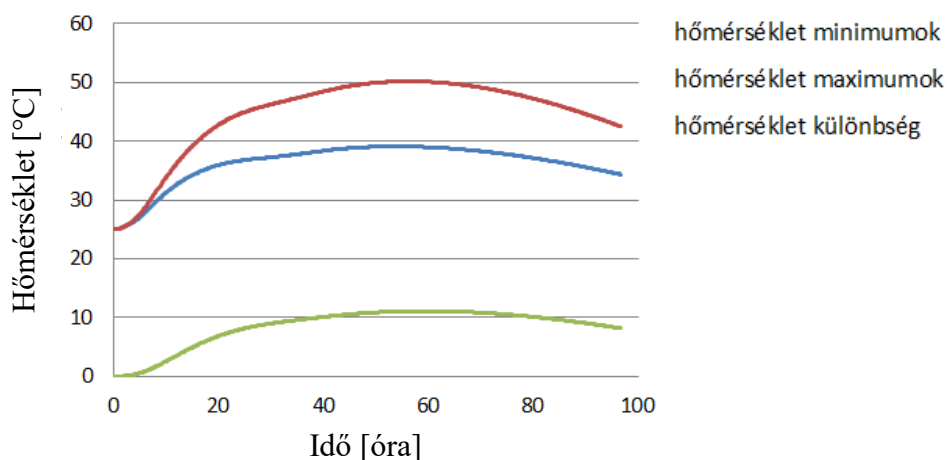
3.5 A talaj befolyásoló hatásának vizsgálati eredményei

A 2.4.3 fejezetben bemutatott vizsgált geometria középpontjában alakult ki a legmagasabb, a sarokpontokon pedig a legalacsonyabb hőmérséklet. A hőmérséklet eloszlását a modellben az 47. ábra szemlélteti, ahol jól látható a talaj hőelvonó hatása.



47. ábra: A hőmérsékletek alakulása a beton próbatestben

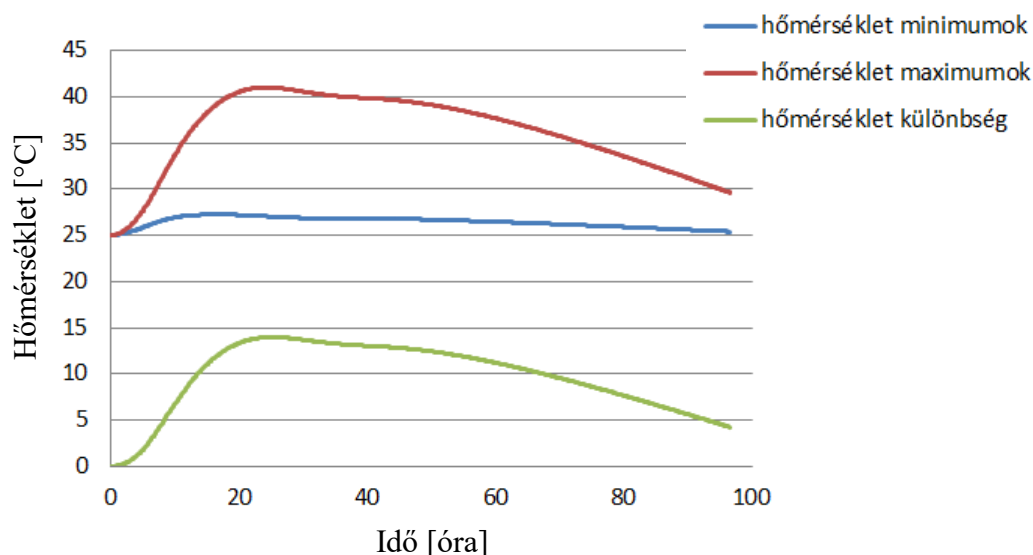
A szimuláció eredményeit a 48., 49., 50. ábrákon található diagramok szemléltetik. A hőmérsékleti minimumok a talajfelszínen az 53,7 órában, amíg a talajban 30 órával később alakulnak ki a beton hőmérsékletét tekintve.



48. 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

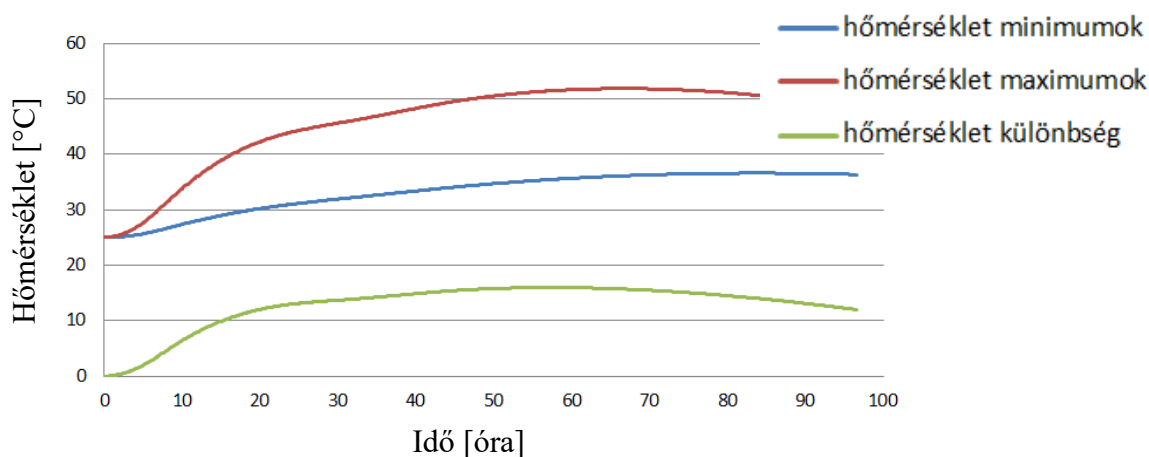
A hőmérsékleti maximumok között 10 óra eltérés van, a talajfelszínen az 56,23 órában, amíg a talajban a 66,7 órában alakulnak ki.

A fenti esetben egy maximális szigeteléssel ellátott betontest látható, így a hőmérséklet-különbség 11,11 °C lett, amíg a 49. ábrán látható diagram szerint a hőszigetelés nélkül 13,97 °C alakul ki. A második esetben a ΔT érték már több mint 20 %-kal több, amely a magasabb hőmérséklet-különbség esetén jelentős növekedést eredményezhet.



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

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



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

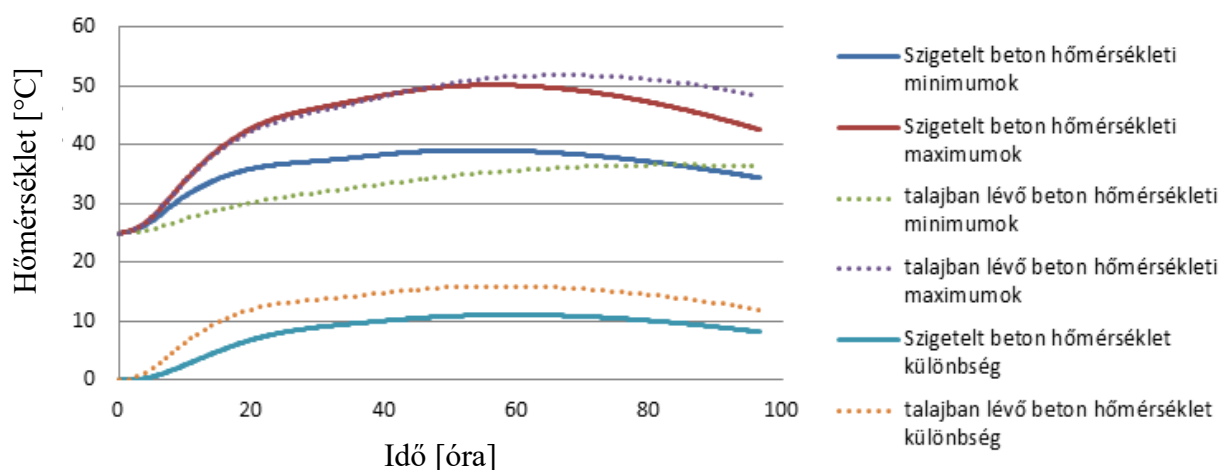
Az 50. ábrán a talajban kialakuló betonhőmérsékleteket mutatom be, ahol a hőmérsékleti maximumok esetén a függvény iránytangense meredekebb, a hőmérsékleti minimumoké viszont alacsonyabb.

A fenti diagramokon ábrázolt eredményeket a 15. táblázatban foglaltam össze, ahol a talajban és a talajfelszínen kialakuló hőmérsékleti minimumok, hőmérsékleti maximumok és hőmérséklet-különbségek kerültek felsorolásra.

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		$T=36,60 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=51,83 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=15,98 \text{ }^{\circ}\text{C}$
		$t=83,57 \text{ h}$	$t=66,70 \text{ h}$	$t=57,06 \text{ h}$

15. táblázat: A vizsgálat eredményeit összefoglaló táblázat

A 51. ábrán látható diagram a táblázatban feltüntetett eredményeket szemlélteti egy diagramban ábrázolva.



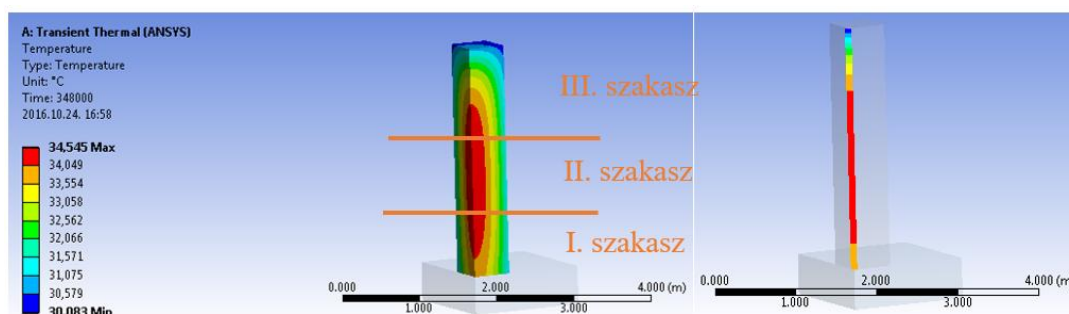
51. ábra: A talajban és talajfelszínen kialakuló minimum és maximum beton hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet-különbség alakulása az idő függvényében

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 függvény 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 hőelvonó hatásának vizsgálati eredményei

A 2.4.4 fejezetben bemutatott vizsgálat eredményeit az alábbiakban foglalom össze. 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 hőmérséklet-változásokat vizsgáltam (52. ábra).

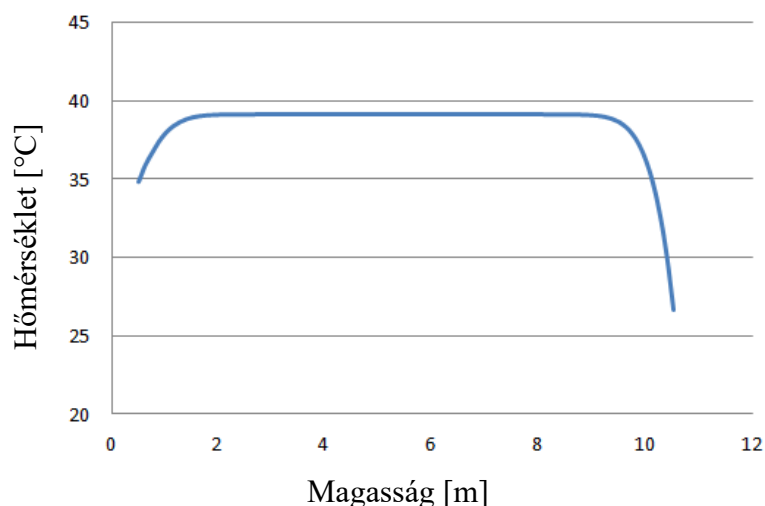


ahol: I. szakasz: talaj – beton, II. szakasz: beton, III. szakasz: beton – levegő kapcsolatát mutatja be

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

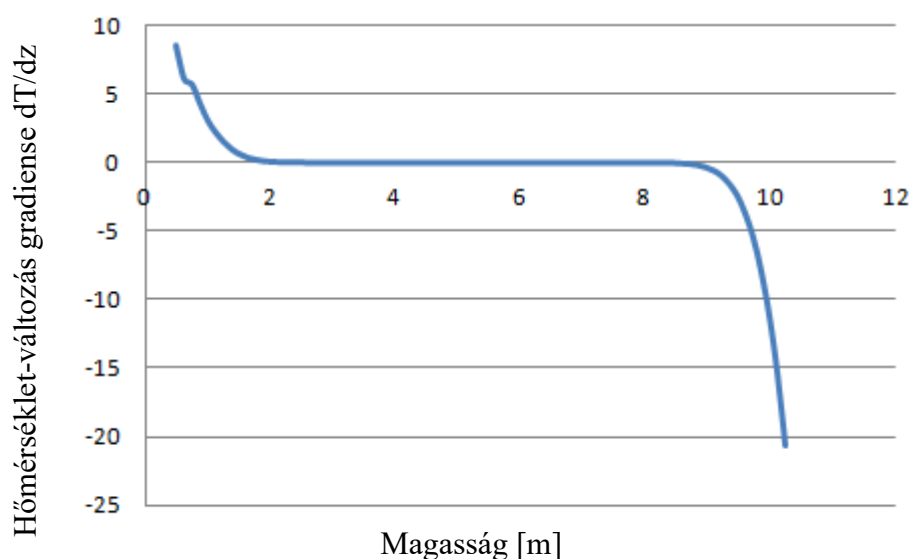
Az analízis eredményei a 17. táblázatban kerültek összefoglalásra, melyből jól látható, hogy a betontest magassága 3 szakaszra bontható hőtani viselkedését tekintve. Az első szakasz a talaj és a betontest, a harmadik szakasz a betontest és a környezeti levegő / szabadon álló betonfelület kapcsolatát jellemzi.

Ezen két szakaszon a hőmérséklet-változás más gradienssel zajlik le, attól függően, hogy milyen a betonnal érintkező közeg konvektív hőtranszport együttható ill. a környezeti hőmérséklet. Az egyes határokat a méterenkénti 1 °C-kal történő hőmérséklet-változás segítségével határoztam meg.



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

A hőmérsékletek alakulását a magasság függvényében az 53. ábrán láthatjuk a hőmérséklet-változás gradiensét pedig az 54. ábrán látható diagram mutatja.



54. ábra: A hőmérséklet-változás gradiense a modellben

A modellekben található 1 °C/m hőmérséklet-változás gradiensétől kisebb változású gradiensű rész magasságára jellemző, hogy itt a talajjal, illetve hasáb tetejének a levegővel való érintkezése nem befolyásolja jelentősen a hőmérséklet-eloszlást (54. 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 16. táblázatban a 3 és a 10 méter magas modellek eredményei kerültek összefoglalásra.

A végeelem modell általános, minimális térfogatú geometriája meghatározható, adott kezdeti és peremfeltételek mellett. Általánosságban elmondható az 1 m x 1 m alaperületű modellről, hogy állandó környezeti hőmérséklet (T) és növekvő konvektív hőtranszport együttható (h) értékek mellett a magasság nő, illetve állandó konvektív hőtranszport együttható (h) és növekvő környezeti hőmérséklet (T) mellett a magasság csökken a geometria felső szakaszát illetően. Ezzel ellentétben állandó környezeti hőmérséklet (T) és növekvő konvektív hőtranszport együttható (h) értékek mellett a magasság csökken, illetve állandó konvektív hőtranszport együttható (h) és növekvő környezeti hőmérséklet (T) mellett a magasság nő a talajjal érintkező szakaszán a modellnek.

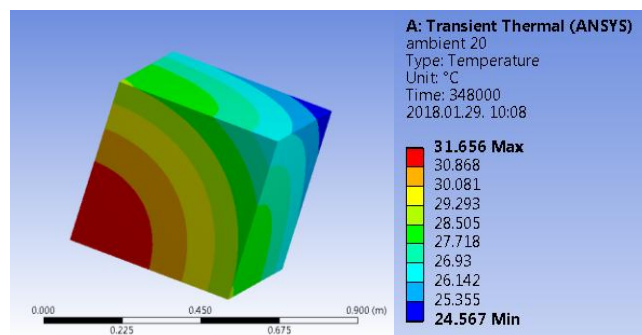
A h és t értékei	3 méter magas modell				10 méter magas modell			
	Talajtól való távolság (m)	A modell tetejétől való távolság (m)	Modell min. magassága (m)	Max. hőmérséklet-különbség időpontja (h)	Talajtól való távolság (m)	A modell tetejétől való távolság (m)	Modell min. magassága (m)	Max. hőmérséklet-különbség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

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

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

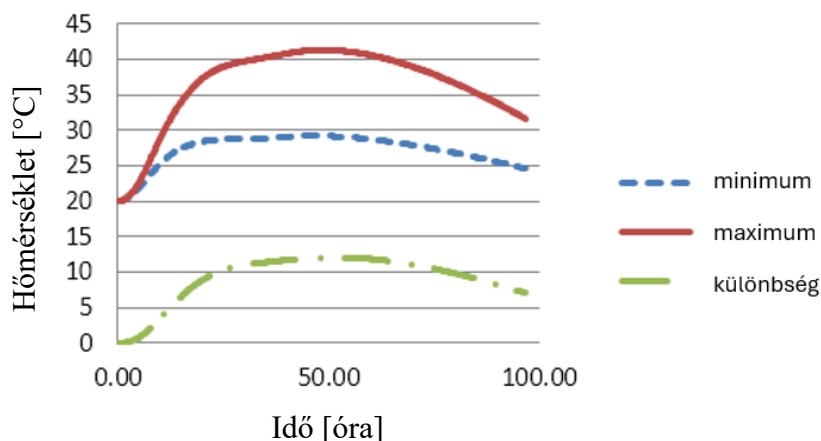
3.7 A változó környezeti hőmérséklet hatásának vizsgálati eredményei

A 2.4.5 fejezetben bemutatott vizsgálat végeselemes analízissel kapott eredményét a 55. ábra szemlélteti, ahol látható, hogy a próbatest sarkainál alakult ki a hőmérsékleti minimum, a belső rész közepén pedig a hőmérsékleti maximum.



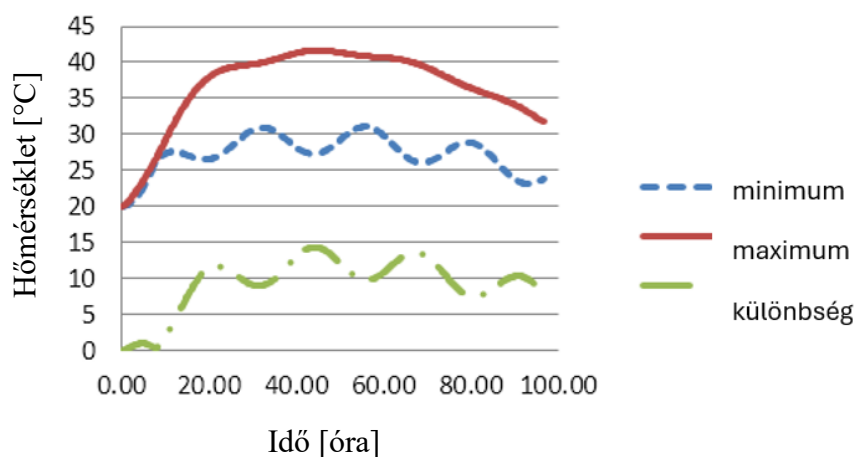
55. ábra: A beton próbatest hőmérsékleti eloszlása $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ esetén

A vizsgálat eredményei alapján elmondható, hogy az állandó és a változó környezeti hőmérséklet esetén eltérő a beton próbatest minimális és maximális hőmérséklete. Az 56. ábra az állandó környezeti hőmérsékletek alakulását mutatja, amely az alkalmazott cement hőtermelési görbéjével azonos lefutású.



56. 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 57. 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.



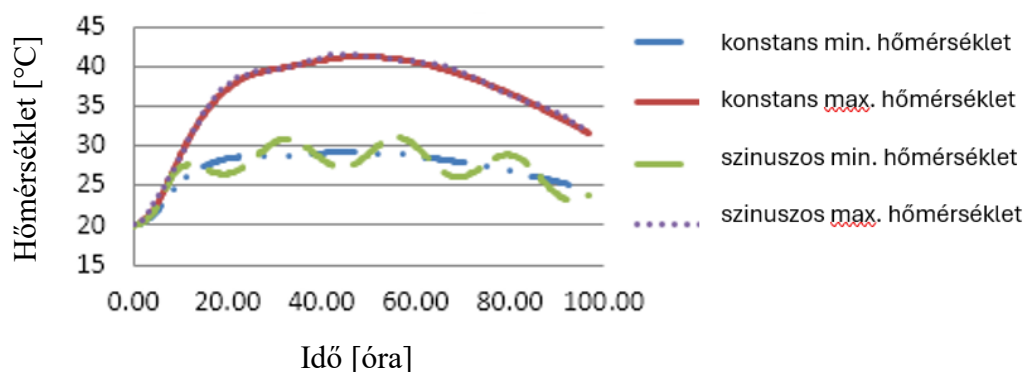
57. ábra: A betonban kialakuló hőmérsékletek változó környezeti hőmérséklet esetén

A vizsgálat során kapott eredményeket a 17. táblázatban foglaltam össze. 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.

	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

17. táblázat: a szimuláció eredményei

Az eredményeket összegző 58. ábrán látható, hogy a változó környezeti hőmérséklet a hőmérsékleti maximumokra alig van hatással.

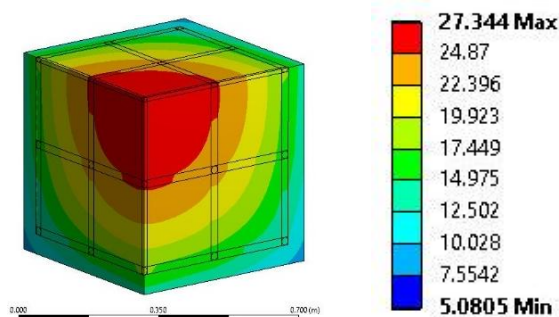


58. ábra A hőmérséklet-különbségek alakulása állandó és változó környezeti hőmérsékletek esetén

A két eredmény sor, azaz az állandó és változó környezeti hőmérsékleti maximumok közel azonosak. A beton felszínén kialakuló hőmérsékleti minimumok esetén a változó környezeti hőmérséklet befolyásoló hatással van, ahogy az 58. ábrán ez látható.

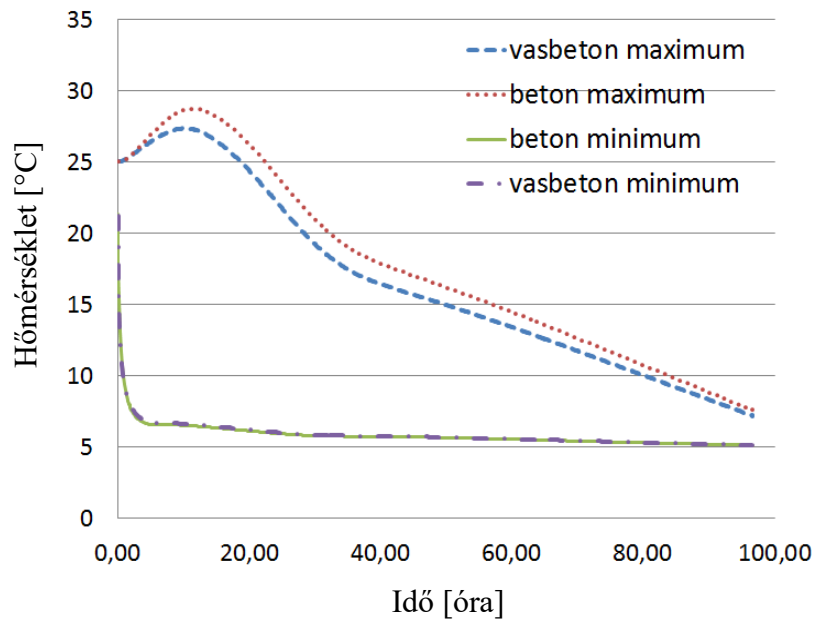
3.8 A betonacél befolyásoló hatásának vizsgálati eredményei

A 2.4.6 fejezetben ismertetett vizsgálati feltételek között az elemzés eredményeképpen megállapítható, hogy mindkét modellnél a hőmérséklet időbeni változása hasonló volt. A 59. ábrán látható a hőmérséklet eloszlás a vasbeton modell szimmetriasíkjában $h=30$ W/(m²K), valamint $T=5$ °C esetén. A geometria középpontjában a legmagasabb, a sarkokban pedig a legalacsonyabb hőmérséklet alakult ki minden kísérleti beállításnál.



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

A kiemelt példáról (60. ábra) valamint a többi esetről is elmondható, hogy a ΔT hőmérséklet-különbséget a hőmérsékleti maximumok befolyásolják számottevően, amíg a hőmérsékleti minimumok hatása minimális.



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

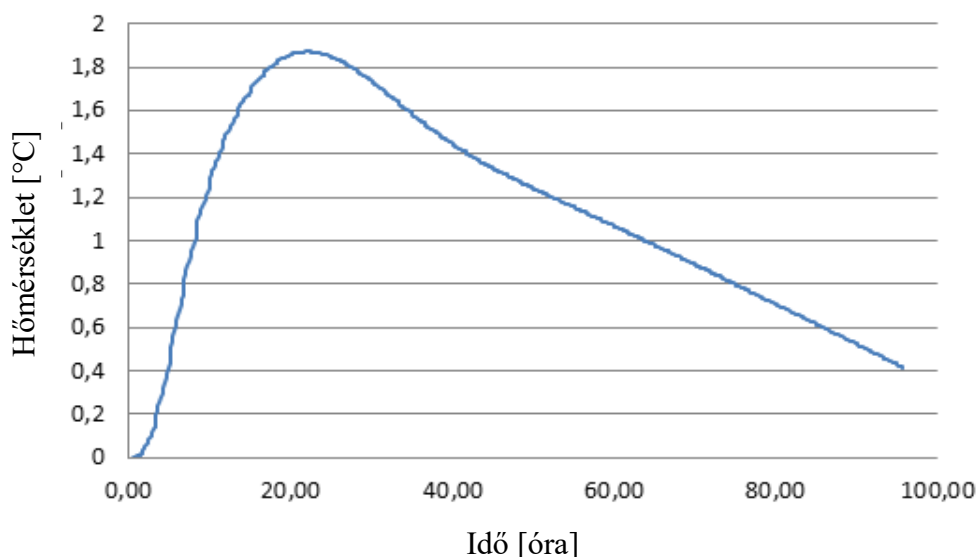
Továbbá a beton és a vasbeton modell eredményeinek összehasonlításakor jól látszik, hogy a hőmérsékleti minimumok esetében nincs befolyásoló hatása a betonacél jelenlétének.

A hőmérsékleti maximumok viszont a két modellnél (beton és vasbeton) eltérnek. A betonacélt is tartalmazó modell maximum hőmérsékletei alacsonyabbak, mint a beton modell esetén. A vizsgálat eredményeit betonacéllal erősített és betonacél nélküli modellek esetén a 18. táblázatban foglaltam össze.

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

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

A kapott eredményekből kiderül, hogy a kísérlettérben a $h=30 \text{ W/m}^2\text{K}$ és $T=5 \text{ }^\circ\text{C}$ -nál a legnagyobb a modellezéskor kapott maximum hőmérsékletek különbsége, amely a 21,75. órában alakul ki. A 61. ábra a maximális hőmérsékletek különbségét szemlélteti az idő függvényében.



61. ábra: A hőmérséklet maximumok hőmérséklet-különbségeinek alakulása az idő függvényében

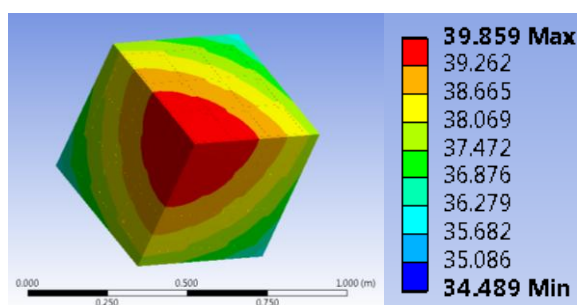
A betonacél befolyásoló hatásának vizsgálata egyértelműen bizonyítja, hogy a hőmérsékleti minimumot nem, a hőmérsékleti maximumot befolyásolja a betonacél jelenléte. Megállapítható, hogy a betonacélok használata a fentiek alapján csökkenti a repedési veszélyt.

3.9 A betonacél befolyásoló hatásának vizsgálati eredményei eltérő mennyiségű betonacél alkalmazása esetén

A 2.4.6 fejezetben bemutatott feltételek között végzett vizsgálat eredményeit – vagyis az eltérő mennyiségű betonacél hatását – a 19. táblázatban foglaltam össze. 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 (62. ábra). A 63. 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. Az 64. ábrán bemutatott és a többi, vizsgált esetben is elmondható, hogy a ΔT hőmérséklet-különbség mértékét a betontestben kialakuló hőmérsékleti maximumok határozzák meg.

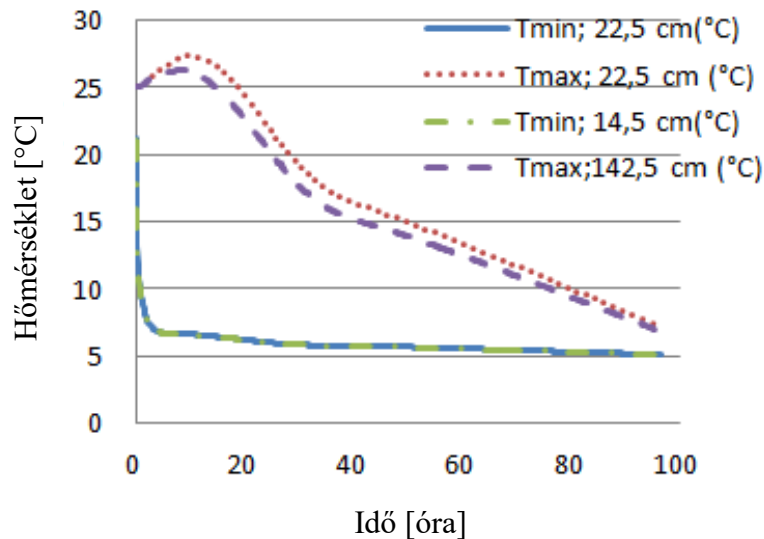
Peremfeltételek	Betonacélok távolsága: 225 [mm]		Betonacélok távolsága: 145 [mm]	
	ΔT_{max} [°C]	Idő [h]	ΔT_{max} [°C]	Idő [h]
$h=5$ [W/m ² K] és $T=5$ [°C]	16,23	23,41	15,06	22,73
$h=5$ [W/m ² K] és $T=30$ [°C]	10,00	54,06	9,12	53,73
$h=30$ [W/m ² K] és $T=5$ [°C]	20,77	10,56	19,61	8,73
$h=30$ [W/m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

19. táblázat: A vizsgálat eredményei eltérő mennyiségű betonacélok alkalmazása esetén



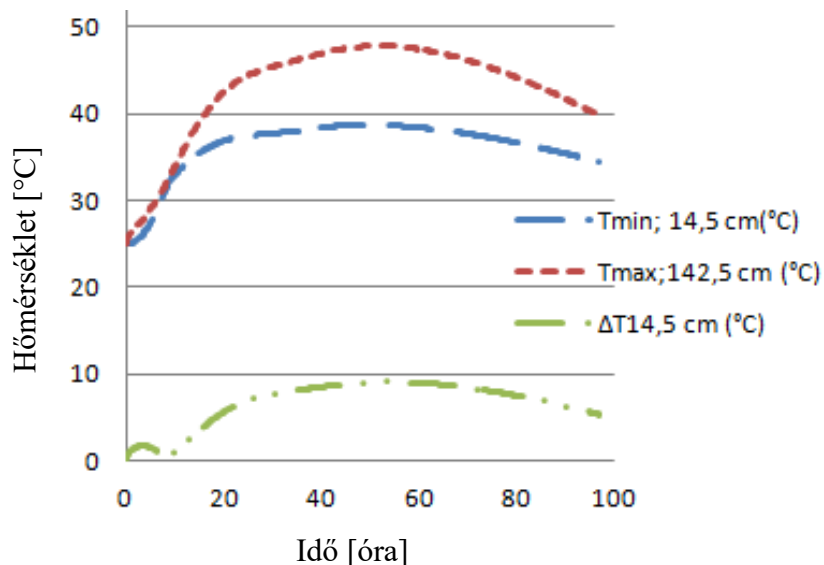
62. ábra: A vasbeton modell szimmetriasíkjában a hőmérséklet eloszlás $h=5$ W/(m²K), valamint $T=30$ °C esetén

Az elemzés során az is kiderült, hogy a két modell esetében a sűrűbb osztásközű betonacél alkalmazásakor a ΔT hőmérséklet-különbség korábbi időpontban érte el maximumát, mint ritkább vasalásnál. A téli betonozás modellezésében (környezeti hőmérséklet $T=5$ [°C]) már jelentősen befolyásolja a hőmérséklet-különbségek alakulását a betonacélok mennyisége. A szigetelés alkalmazásakor, ahol $h=5$ [W/m²K] és $T=5$ [°C] a sűrűbb osztásközű betonacél alkalmazása mellett a betonban kialakuló 36,77 °C-os maximális hőmérséklet a 21,67. órában tapasztalható. A 15.-16. órában fellépő maximális hőmérséklet-különbség viszont így sem éri el a beton tönkremenetelét jelző 20 °C-ot.



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

A legkisebb hőmérséklet-különbség a $h=5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ és $T=30 \text{ °C}$ peremfeltételek esetén alakult ki (64. ábra) (nyári betonozás modellezése, hőszigetelő lemezekkel kiegészített zsaluzat). Annak ellenére, hogy a hőmérsékleti maximum az 51,68 órában a $47,81 \text{ °C}$ -os hőmérsékletet is elérte, a hőszigetelő lemezek hatására az elnyújtott hőtermelés következtében nem tudott kialakulni 10 °C -nál magasabb hőmérséklet-különbség a betonmodellben.



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

Ehhez hasonlóan a nyári betonozást reprezentáló $h=30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ és $T=30 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 elemzési eredmények alapján megállapítható, hogy a repedés kialakulása a $h=30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ konvektív hőtranszport együttható és $T=5 \text{ }^\circ\text{C}$ környezeti hőmérsékleti feltételek esetén a legvalószínűbb. A hőszigetelés nélkül hagyott zsaluzat a téli betonozáskor előidézheti a tönkremenetelt, mivel a kialakult $20,77 \text{ }^\circ\text{C}$ -os hőmérséklet-különbség a megengedett $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -os hőmérsékleti különbséget meghaladta a 10,56. órában. Viszont a 14,5 cm-es osztásközű vasalás esetén a ΔT hőmérséklet-különbség $19,61 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra csökkent a 8,73. órában.

ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

Kutatásom összegzése

Az értekezésben a tömegbeton szerkezetek készítésekor felmerülő problémákat tanulmányoztam, elsősorban a cement kötési folyamata során kialakuló hőmérsékletek és hőmérséklet-különbségek szempontjából. A nagy tömegű beton szerkezetek esetén a betontest belső részén 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 habarcsstartó hőtani tulajdonságait forróvizés mérés segítségével. A kidolgozott modell megfelelőségét statisztikai módszerekkel ellenőriztem. A vizsgálat eredményeképpen kA szorzat segítségével sikerült összekapcsolnom a féladiabatikus modellt az elméleti, hővesztés 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 kaloriméterrel ezt követően a CEM I és CEM III típusú cementeket vizsgáltam, ennek mérési eredményeit alkalmaztam a végeselemes analízishez bemeneti paramétereként.

A végeselemes analízis során különböző szituációkat vizsgáltam, ahol egyrészt az volt a cél, hogy a szimulációk során alkalmazandó minimális térfogatot definiáljam, másrészt a különböző betonozási esetek kezdeti feltételeire – betontechnológiai szempontból – releváns információkat származtassak.

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 alakulását 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 együttható növekedése időben előrébb hozza.

A következő kutatási téma a talajfelszín alatti szerkezet kialakítására és hatására 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 esetén a talajban való betonozás során repedésveszély nagy valószínűséggel nem alakul ki a korai kötési szakaszban.

A korábbiakban már kialakított vizsgálati mátrixot alkalmazva a talaj és a levegő hőelvonó hatását is vizsgáltam két, szignifikánsan eltérő méretű (3 ill. 10 méter magasság) betonmodell hőtani elemzésével. A vizsgálat eredményeképpen meghatároztam a vizsgálni érdemes betontest minimális geometriai méretét.

A fentiekben állandó betonozási 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 modellből adódó eredmény rámutatott, hogy a betonozás kezdő időpontjának megválasztása és az aktuális időjárási iszonyok figyelembevétele hogyan kínálhat megoldást a repedésveszély elhárítására.

A kutatásom másik nagyobb területe az építésben is gyakran alkalmazott szerkezet, a vasbeton vizsgálata. Elsőként 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 eltérést eredményezett a különböző mennyiségű betonacélok elhelyezése a szerkezetben. Egyértelműen igazolást nyert, hogy a nagyobb mennyiségű betonacél használata a környezeti hőmérséklettől és a konvektív hőtranszport együtthatótól függetlenül minden esetben csökkentette a szerkezetben kialakuló maximális hőmérséklet-különbséget. Ennek okán már előre jelezhető a betonacél mennyiségének ismeretében a repedéskockázat.

Új tudományos eredmények

T1: Féladiabatikus rendszerben mért hőmérsékleti értékek adiabatikus rendszert leíró hőmérsékletté alakíthatók hőtani kompenzációs modell segítségével. 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 betonkeverék alkalmazása esetén az 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) a tömegbeton kötésekor kialakuló maximális hőmérséklet függése a környezeti hőmérséklettől elsőfokú, a konvektív hőtranszport együtthatótól pedig másodfokú polinommal jellemezhető:

$$\Delta T = a + b T + c h + d h^2$$

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 hőmérséklet-különbség időpontját.

T3: Szimulációval igazoltam, hogy az 1m x 1m alapterületű, 3, illetve 10 méter magasságú beton próbatestek esetén a 1,5m x 1,5m x 0,5m térfogatú talaj felé történő hőáramlás befolyásolja a teljes rendszerben kialakuló hőmérsékleti maximumok kialakulását. A kis hőfejlesztésű CEM III B 32,5 N jelű cementből készített betonkeverék alkalmazása esetén az 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 állandó) a beton próbatest hőtani szempontból 3 jellegzetes tartományra osztható: I. tartomány, melyre hatással van a talaj hőelvonó képessége az alsó határfelületén és a környezeti levegővel az oldalsó határfelületen érintkezik, II. tartomány, mely a környezeti hőmérsékletű levegővel csak az oldalsó határfelületeken érintkezik, III. tartomány, mely az oldalsó és a felső határfelületeken érintkezik a környezeti hőmérsékletű levegővel. A legnagyobb hőmérséklet-különbség I.

tartományában alakul ki, vagyis a teljes szerkezet vonatkozásában az ebben a tartományban kialakuló hőmérsékleti eltérés a meghatározó.

T4: Szimulációval igazoltam a 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 kísérlethez (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 állandó) a környezeti hőmérséklettől és a konvektív hőtranszport együtthatótól függetlenül a vizsgált betonacél kiosztások (0,65 ‰ és 1,35 ‰) csökkentik az adott időpillanatban kialakuló hőmérséklet-különbséget a betonacélt nem tartalmazó tömegbetonokhoz képest. A definált kísérlethez a $h=30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ és $T=5^\circ\text{C}$ peremfeltételek mellett a:

- betonacélt nem tartalmazó próbatestben $21,1^\circ\text{C}$,
- 0,65 ‰ mennyiségű betonacél alkalmazásakor $20,7^\circ\text{C}$,
- 1,35 ‰ mennyiségű betonacél esetén, $19,6^\circ\text{C}$ a kialakuló hőmérséklet-különbség, ezért betonacél használatkor is szükséges a külső hőmérséklettől függő hőszigetelés tervezése.

T5: Szimulációval igazoltam a minimálisan szükséges próbatest magasságot egy $1\text{m} \times 1\text{m}$ alapterületű betontestre vonatkoztatva, amelyenél a talaj és a levegő által okozott hőáramlás egymástól függetlenül jellemezhető. A véges elemes modellben (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 hőmérséklete 25°C) a minimális geometriai magasság 1,3 méter és 2,2 méter közötti kell legyen a hőszigetelés és a környezeti hőmérséklet függvényében.

T6: Szimulációval igazoltam, hogy $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ térfogatú, CEM III B 32,5 N jelű cementből készített betonkeverék alkalmazása esetén (ahol a környezeti átlag hőmérséklet 20°C , a hőmérséklet-változás $\pm 5^\circ\text{C}$, a frissbeton bedolgozási hőmérséklete 20°C volt, és a konvektív hőtranszport együttható $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) a változó környezeti hőmérséklet a beton próbatestben és annak felszínén kialakuló hőmérsékletekre is befolyásoló hatással van. Időben változó környezeti hőmérséklet esetén a kialakult maximális hőmérséklet-különbség időpontja a változó környezeti hőmérséklet minimum értékéhez tartozik.

SUMMARY

In this dissertation, I have studied the problems arising during the construction of mass concrete structures, primarily from the perspective of the temperatures and temperature differentials developing during the cement hydration process. In the case of large-scale concrete structures, the temperature difference between the core and the surface of the concrete body can lead to cracking, which jeopardizes the durability and, consequently, the structural stability of the entity.

During my work, I designed and assembled a unique calorimeter, which enables the rapid and economical testing of cement mortar samples related to specific projects. I performed digital thermometer compensation on the calorimeter designed for concrete heat generation, then investigated the thermal properties of the insulated mortar container using differential equations via hot-water measurements. The adequacy of the developed model was verified using statistical methods. As a result of the study, I successfully linked the semi-adiabatic model to the theoretical, lossless case using the kA product; thus, I defined a monotonically varying function for the temperature of the concrete mortar. Using this function and knowing the physical characteristics of the mortar, I determined the heat generation per 1 m^3 for the CEM III sample as a function of time. Subsequently, I examined CEM I and CEM III type cements with the calorimeter and applied these measurement results as input parameters for finite element analysis.

During the finite element analysis, I examined various scenarios where the objective was, on one hand, to define the minimum volume to be applied during simulations and, on the other hand, to derive relevant information regarding the initial conditions of different pouring cases from a concrete technology perspective. I investigated simulated weather conditions - winter and summer concreting - as well as pouring with and without thermal insulation. Based on the results of the finite element model, it can be stated that within the investigated experimental space, the development of the minimum temperature is significantly influenced by the rate of change in ambient temperature during the first 12 hours. The occurrence of the maximum temperature is expected after the early hardening phase of the concrete mix; its timing depends on the ambient temperature and the convective heat transfer coefficient defined by the environment. An increase in ambient temperature delays the timing of the maximum temperature difference, while an increase in the convective heat transfer coefficient brings it forward in time.

The next research topic concerned the construction and impact of subsurface structures. I established that during concreting in soil, the temperature difference reaches its peak earlier than in the case of surface structures; therefore, this must be taken into account during sequential pouring. Given the initial and boundary conditions considered in the simulation, it is highly probable that a risk of cracking does not develop during the early hydration stage when pouring in soil. Utilizing the previously established test matrix, I also examined the heat-extracting effect of soil and air through the thermal analysis of two concrete models with significantly different dimensions (3 and 10 meters in height). As a result of the study, I determined the minimum geometric size of the concrete body worth investigating.

In the aforementioned studies, I assumed a constant ambient temperature during pouring. However, my research also extended to the simulation of varying ambient temperatures. The practical reason for this is the daily temperature fluctuation—between day and night—which can often influence the planned start time of concreting, especially when planning summer pours. The results from the simplified model pointed out how the selection of the pouring start time and the consideration of current weather conditions can offer a solution for mitigating the risk of cracking.

The other major area of my research was the investigation of reinforced concrete, a structure frequently used in construction. First, I examined the development of temperatures in unreinforced and reinforced models. I established that the difference between the minimum temperatures in the given experimental space is negligible between the reinforced and unreinforced models. In contrast, the presence of reinforcing steel bars has a significant effect on the temperature maximums developing within the concrete structure.

Taking the above results into account, I investigated the effect of varying amounts of reinforcement within a given concrete volume. I established that, under the applied initial and boundary conditions, the placement of different quantities of reinforcing steel resulted in thermal variances within the structure. It was clearly demonstrated that the use of a larger amount of reinforcement reduced the maximum temperature difference developing in the structure in all cases, regardless of the ambient temperature and the convective heat transfer coefficient. Consequently, the risk of cracking can be predicted in advance based on the knowledge of the quantity of reinforcing steel.

TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

- [P1] Domonyi, Erzsébet; Dr. Barányi, István; Dr. Réger, Mihály Antal, Egyedi féladiabatikus kaloriméter fejlesztése, GÉP 72: 3-4 pp. 13-16. , 4 p. (2021)
- [P2] 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.)
- [P3] 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)
- [P4] 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)
- [P5] 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.)
- [P6] Domonyi Erzsébet, Tömegbeton szerkezetek hőmérséklet eloszlása a talajban, Nemzetközi Gépész és Biztonságtechnikai Szimpózium = International Engineering Symposium, IESB 2017, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, (2017) pp. 33-33. , 1 p.
- [P7] Domonyi Erzsébet, TÖMEGBETONOK HŐTANI MODELLJÉNEK FEJLESZTÉSE, Proceedings of 8th International Engineering Symposium at Bánki (IESB 2016), Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem (2016) pp. 1-4. , 4 p.
- [P8] Domonyi, Erzsébet Cracking risk analysis of the mass concrete in a function of ambient temperature, Timisoara, Románia (2018) pp. 20-20. , 1 p.
- [P9] 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)
- [P10] 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)

[P11] Erzsébet Domonyi, Prof. Dr. Mihály Réger, Prof. Dr. András Zachár, Design and Characterization of a Semi-Adiabatic Calorimeter, ACTA TECHNICA JAURINENSIS, 2026, in press, IF 0.23

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] 2024. évi LXXXIV. törvény a kritikus szervezetek ellenálló képességéről, Hatályos: 2026.01.06-tól, <https://njt.hu/jogszabaly/2024-84-00-00>, (Letöltve:2026.03. 23.)
- [2] ACI Committee 116: „Cement and Concrete terminology (AC116R-00),” 2000 (Reapproved 2005), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 73pp.
- [3] 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.)
- [4] Dr. Balázs György: Különleges Betonok és betontechnológiák I., Akadémiai Kiadó, Budapest, 2007, ISBN 978-963-05-8465-4
- [5] Gözölhetőség, <https://betonnet.hu/gozolhetoseg/> (letöltve: 2022.08.03)
- [6] T. Hirschi, H. Knauber, M. Lanz, J. Schlumpf, J. Schrabback, C. Spirig, U. Waeber, Magyar kiadás: Asztalos István, Sika Beton kézikönyv, p.116, <https://hun.sika.com/dms/getdocument.get/2801286c-2941-3766-9b45-fb137c529d62/Sika%20Beton%20Kezikonyv.pdf> (letöltve: 2026.03.20)
- [7] Bálint Julianna: Építőanyagok I, SZIE-YMÉK, Építőanyag és Minőségirányítás Tanszék, jegyzet, 2005, ISBN 978-963-7169-29-8
- [8] Zement-Taschenbuch, Verein Deutscher Zementwerke e.V. 51. Ausgabe. Verlag Bau+Technik GmbH., Dusseldorf, 2008., 5.4.1. fejezet, pp. 329-332, https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/Zement_Taschenbuch_2008.pdf, (Letöltve: 2022. 05.01.)
- [9] Dr. Kausay Tibor, Fiatal beton szilárdulási folyamata 1. rész, Beton, 2010/12 pp 6-8, <https://www.betonopus.hu/notesz/fogalomtar/65-fiatal-beton.pdf>, (Letöltve: 2022. 04.16.)
- [10] Dr. Kausay Tibor: Betonos e Könyv I. kötet, Budapest, 2020. június, ISBN 978-615-00-6699-8, magánkiadás pp 457-473
- [11] Juhász Károly Péter, Betontechnológia 01-alkotóanyagok pdf. p. 6, <https://epulet diagnosztika.net/cms/wp->

content/uploads/2020/12/betontechnologia_01_alkotoanyagok_es_betontervezes.pdf

(Letöltve: 2023. 09.22.)

[12] A CEM III/B 32,5 N-LH/SR kohósalakcement termékadatlapja, Duna-Dráva Cement Kft., Vác, <https://www.duna-drava.hu/hu/kohosalakcement-EN-197-1-CEM-III-B-32-5-N-LH-SR-vac> (letöltve: 2026.03.10.)

[13] B. Klemczak, Agnieszka Knoppik-Wróbel, Reinforced concrete tank walls and bridge abutments: Early-age behaviour, analytic approaches and numerical models, *Engineering Structures*, Volume 84 (2015) pp 233-251, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.11.031>

[14] B. A. Klemczak: Modeling thermal-shrinkage stresses in early age massive concrete structures – Comparative study of basic models, *Archives of civil and mechanical engineering*, Volume 14 (2014) pp 721-733, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.01.002>

[15] Fragkoullis Kanavaris, Agnieszka Jedrzejewska, Ioannis P. Sfikas c, Dirk Schlicke, Selmo Kuperman, Vít Šmilauer, Túlio Honório, Eduardo M.R. Fairbairn, Gabriella Valentim, Etere Funchal de Faria, Miguel Azenha, Enhanced massivity index based on evidence from case studies: Towards a robust pre-design assessment of early-age thermal cracking risk and practical recommendations, *Construction and Building Materials* 271 (2021) 121570, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121570>

[16] Xiaoda Li, Zhipeng Yu, Kexin Chen, Chunlin Deng, Fang Yu, Investigation of temperature development and cracking control strategies of mass concrete: A field monitoring case study, *Case Studies in Construction Materials* 18 (2023) e02144, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02144>

[17] Yuxiang Zhang, Jianwen Pan, Xinjian Sun, Jijun Feng, Dengqiang Sheng, Haiyun Wang, Xinjie Zhou, Yinpeng He, Mushuang Diao, Qibing Zhan, Simulation of thermal stress and control measures for rock-filled concrete dam in high-altitude and cold regions, *Engineering Structures* 230 (2021) 111721, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111721>

[18] Dr. Szalai Kálmán, EUROCODE 2 beton és vasbetonszerkezetek tervezése, Kézirat Budapest (BME Vasbetonszerkezetek Tanszéke)

[19] 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

[20] Xu-Jing Niu, Qing-Bin Li, Wei-Jia Liu, Yu Hu, Effects of ambient temperature, relative humidity and wind speed on interlayer properties of dam concrete, *Construction*

- and Building Materials 260 (2020) 119791, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119791>
- [21] P. Liu, Y. Chen, Z. Yu, Effects of temperature, relative humidity and carbon dioxide concentration on concrete carbonation, *Mag. Concr. Res.* 72 (2020) 936–947, <https://doi.org/10.1680/jmacr.18.00496>.
- [22] 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
- [23] S. Wang, A. Abdulridha, J. Bravo, et al., Thermal energy storage in concrete: Review, testing, and simulation of thermal properties at relevant ranges of elevated temperature, *Cement Concr. Res.* 166 (2023), 107096. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107096>
- [24] 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*, Volume 80 (2014), pp 173-188, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.08.050>
- [25] G. M. Moelich, J. E. van Zyl, N. Rabie, and R. Combrinck, “The influence of solar radiation on plastic shrinkage cracking in concrete,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 123, article 104182, 2021.
- [26] Yuqin Zhao, Gaosheng Li, Caixia Fan, Wentai Pang, and Yongtao Wang, Effect of Thermal Parameters on Hydration Heat Temperature and Thermal Stress of Mass Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2021, Article ID 5541181, 16 pages, <https://doi.org/10.1155/2021/5541181>
- [27] Yinuo Zhang, Songqing Wang, Shijing He, Xiangwei Hao, Analysis of factors influencing the temperature field variation in mass concrete during hydration heat release, *Case Studies in Thermal Engineering* 52 (2023) 103737, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103737>
- [28] Y. Xie, C. Qian, A novel numerical method for predicting the hydration heat of concrete based on thermodynamic model and finite element analysis, *Mater. Des.* 226 (2023), 111675
- [29] B.N.K. Raja, S. Miramini, C. Duffield, et al., The influence of ambient environmental conditions in detecting bridge concrete deck delamination using infrared thermography (IRT), *Struct. Control Health Monit.* 27 (4) (2020), e2506

- [30] A.E. Klausen, T. Kanstad, Ø. Bjøntegaard, The cracking risk of hardening concrete exposed to realistic curing temperature regimes and restraint conditions—Experimental investigations of important parameters, *Construct. Build. Mater.* 338 (2022), 127662. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127662>
- [31] Hung-Liang (Roger) Chen, Seyednavid Mardmomen, Guadalupe Leon, On-site measurement of heat of hydration of delivered mass concrete, *Construction and Building Materials* 269 (2021) 121246, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121246>
- [32] Lerch, W.: Effect of SO₃ Content of Cement on Durability of Concrete. PCA Research and Development (1945) 0285, pp 9
- [33] 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, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00189>
- [34] Guowen Sun, Haorui Zheng, Ligu Wang, Liang Peng, Haitao Yang, Yifan Li, Prediction of the hydration heat, temperature distribution and thermal stress of mass concrete, *Case Studies in Construction Materials* 24 (2026) e05748, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05748>
- [35] Jochen Stark, Katrin Bollman: Delayed Ettringite Formation in Concrete, *Nordic Concrete Research*, 2000, <https://www.structuralguide.com/wp-content/uploads/2022/06/Delayed-Ettringite-Formation-in-Concrete.pdf> (letöltve: 2023.07.26.)
- [36] Lu H.R., Swaddiwudhipong, S and Wee, T.H., Evaluation of Thermal Crack by a probabilistic Model Using the Tensile Strain Capacity, *Magazine of Concrete Research*, (2001) Vol. 53, No.1, pp. 25-30. <https://doi.org/10.1680/mac.2001.53.1.25>
- [37] American Concrete Institute, Report on Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete (ACI 207.4R-20), American Concrete Institute, Michigan USA, 2020.
- [38] Zhou Yunchuan, Bai Liang, Yang Shengyuan, Chen Guting: Simulation Analysis of Mass Concrete Temperature Field., *Procedia Earth and Planetary Science*, Volume 5 (2012) pp 5 – 12, <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2012.01.002>
- [39] J. Conceição, R. Faria, M. Azenha, et al., A new method based on equivalent surfaces for simulation of the post-cooling in concrete arch dams during construction, *Eng. Structures* 209 (2020), 109976.

- [40] Y. Hong, J. Lin, A.H.D. Cheng, et al., Thermal analysis of heat transfer in pipe cooling concrete structure by a meshless RBF-FD method combined with an indirect model, *Int. J. Therm. Sci.* 152 (2020), 106296.
- [41] Ju-Hyung Ha, Youn su Jung, Yun-gu Cho: Thermal crack control in mass concrete structure using an automated curing system: *Automation in Construction* Volume 45 (2014) 16–24, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.04.014>
- [42] T.A. Do, D. Verdugo, M. Tia, et al., Effect of volume-to-surface area ratio and heat of hydration on early-age thermal behavior of precast concrete segmental box girders, *Case Stud. Therm. Eng.* 28 (2021), 101448.
- [43] G. De Schutter, M. Vuylsteke: Minimisation of early age thermal cracking in a J-shaped non-reinforced massive concrete quay wall, *Engineering Structures* Volume 26 (2004) pp. 801–808, DOI:10.1016/j.engstruct.2004.01.013
- [44] Feng Lin, Xiaobin Song, Xianglin Gu, Bin Peng, Lianping Yang: Cracking analysis of massive concrete walls with cracking control techniques, *Construction and Building Materials* Volume 31 (2012) pp 12–2, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.086>
- [45] Wang, K., Taylor, P. C., Fick, G., & Ge, Z. (2007). Developing a simple and rapid test for monitoring the heat evolution of concrete mixtures (Phase II report). CP Tech Center, Iowa State University.
- [46] Swamy Vandanapu, K. Muthumani: Heat of Hydration and Alkali- Silicate Reaction in Oil Palm Shell Structural Lightweight Concrete, *Silicon* 12, 2020, pp.1043-1049, <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00202-9>
- [47] John C. O’C. Young, Coffee Cup Calorimeter Heat Loss Correction, *The Chemical Educator* 2016, 21, pp. 53–62, DOI:10.1333/s00897162683a
- [48] MSZ EN 196-1:2010 Magyar Szabványügyi Testület: Cementvizsgálati módszerek-Hidratációs hő. Féladiabatikus módszer. 2010 október.
- [49] 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, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00093-3)
- [50] 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>
- [51] R. Springenschmid: *Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*, CRC Press, 1998. pp. 364

- [52] Šiler, P., Kolářová, I., Novotný, R., Másilko, J., & Šoukal, F. (2020). Use of isothermal and isoperibolic calorimetry to study the effect of zinc on hydration of cement blended with fly ash. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141, 2997–3006. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09633-5>
- [53] 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).
- [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] Pang, X., Bentz, D. P., Meyer, C., Funkhouser, G. P., & Darbe, R. (2013). A comparison study of Portland cement hydration kinetics as measured by chemical shrinkage and isothermal calorimetry. *Cement and Concrete Composites*, 39, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.007>
- [56] Gallucci, E., Ferraris, C. F., & Scrivener, K. L. (2007). Chemical shrinkage and microstructure of cement pastes and mortars in the very early age. *Cement and Concrete Research*, 37 (3), 322–331. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.002>
- [57] Winnefeld, F., & Lothenbach, B. (2010). Hydration of calcium sulfoaluminate cements—Experimental findings and thermodynamic modelling. *Cement and Concrete Research*, 40 (8), 1239–1247. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.021>
- [58] Knapen, E., & van Gemert, D. (2009). Cement hydration and strength development of concrete subjected to low and moderate temperatures. *Construction and Building Materials*, 23 (2), 545–555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.011>
- [59] Pt100 Ellenállás-hőmérős (RTD) Érzékelés, <https://www.tckft.hu/rtd-pt100-reference/rtd-pt100-data.html#rtd-theory> (Letöltve:2022.08.03.)
- [60] Chih-Yuan Chang, San-Shan Hung: Implementing RFIC and sensor technology to measure temperature and humidity inside concrete structures: *Construction and Building Materials* Volume 26 (2012) pp. 628-637, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.066>
- [61] Bagi Katalin: A diszkrét elemek módszere, BME Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék, Budapest, 2007, ISBN 978-963-420-929-4
- [62] A. Kuryłowicz-Cudowska, K. Wilde, FEM and experimental investigations of concrete temperature field in the massive stemwall of the bridge abutment, *Construct. Build. Mater.* 347 (2022), 128565

- [63] Y. Xie, W. Du, Y. Xu, et al., Temperature field evolution of mass concrete: from hydration dynamics, finite element models to real concrete structure, *J. Build. Eng.* 65 (2022), 105699.
- [64] Zhoujiaozi Yu a, Yulu He a, Fei Tan a,*, Defu Tong, Three-dimensional numerical manifold method for thermal stress calculation of mass concrete, *Construction and Building Materials* 491 (2025) 142769, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142769>
- [65] C. Lyu, M. Xu, X. Lu, et al., Research on thermal-humidity-force coupling characteristics of mass concrete structures under temperature control, *Constr. Build. Mater.* 398 (2023) 132540, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132540>.
- [66] T. Wan, H. Zheng, W. Wu, et al., Fully coupled dynamic hydraulic fracturing of saturated porous media based on the numerical manifold method, *Eng. Anal. Bound. Elem.* 169 (2024) 105987, <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.105987>.
- [67] X. Xu, Z. Wu, L. Weng, et al., Investigating the impacts of reinforcement range and grouting timing on grouting reinforcement effectiveness for tunnels in fault rupture zones using a numerical manifold method, *Eng. Geol.* 330 (2024) 107423, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107423>.
- [68] 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, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.072>
- [69] Xiaobin Song, Yeqi Li, Chao Chen, Feng Lin, Susu Shang: Modeling early age RC slab cracking considering time-dependent bond behaviour, *Engineering Structures* Volume 138 (2017) pp. 27–34, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.015>
- [70] E.N. Ivanov, K.S. Semenov, Yu.G. Barabanshchikov, S.V. Akimov, A.S. Kuleshin, N.S. Titov, Concrete heat liberation in thermal stressed state analysis, *Magazine of Civil Engineering*. 2023. 124(8). Article No. 12409, DOI: 10.34910/MCE.124.9
- [71] Smolana, A.; Klemczak, B.; Azenha, M.; Schlicke, D., Thermo-Mechanical Analysis of Mass Concrete Foundation Slabs at Early Age—Essential Aspects and Experiences from the FE Modelling, *Materials* 2022, 15, 1815. <https://doi.org/10.3390/ma15051815>
- [72] 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, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.03.004>

- [73] 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, DOI:10.1016/j.protcy.2016.08.087
- [74] Maninder Pal Singh, Subhamoy Sen, Himanshu Pathak, Ajay Bhushan Dogra, Early age cracking relevant to mass concrete dam structures during the construction schedule, Construction and Building Materials 411 (2024) 134739, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134739>
- [75] Qingbin Li, Junfeng Guan, Zhimin Wu, Wei Dong, Shaowu Zhou, Equivalent maturity for ambient temperature effect on fracture parameters of site-casting dam concrete, Construction and Building Materials 120 (2016) pp 293-308, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.111>
- [76] D. A. Hordijk, H. W. Reinhardt, Fracture of concrete in uniaxial tensile experiments as influenced by curing conditions, Engineering Fracture Mechanics, 35 (1990) pp 819-826, [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(90\)90166-E](https://doi.org/10.1016/0013-7944(90)90166-E)
- [77] 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, <https://koasas.kaist.ac.kr/bitstream/10203/20281/1/000223824500008.pdf> (Letöltve: 2026. 03.10.)
- [78] Guoqing Wang, Meng He, Canjun Zhou, Wen Xie, Xinglin Liu, Jin Chen, Hua Liu, Bingbing Lei, and Mingli Zhang, Temperature and Temperature Stress Analysis in Mass Concrete under Cold Environments of Strong Wind and Large Diurnal Temperature Range, Geofluids, Volume 2022, Article ID 3064754, 16 pages <https://doi.org/10.1155/2022/3064754>
- [79] Z. J. Li, Z. H. Li, P. Yu, L. C. Xu, and X. D. Fu, “Monitoring and finite element analysis of temperature and stress field of mass concrete for tower platform,” Journal of Railway Science and Engineering, vol. 17, no. 11, pp. 2892–2900, 2020.
- [80] Yehong Hu, Jin Chen, Feng Zou, Meng He, Jianguo Mao, Xinglin Liu, Canjun Zhou, Zhongxia Yuan, A comparative study of temperature of mass concrete placed in August and November based on on-site measurement, Case Studies in Construction Materials 15 (2021) e00694, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00694>
- [81] Bamforth, P.B. Early-Age Thermal Crack Control in Concrete; CIRIA C660; CIRIA: London, UK, 2007; 268p

[82] 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 (Letöltve: 2022. 07.06.)

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

ACI	American Concrete Institute (Amerikai Betonintézet)
ASR	Alkali-silica reactivity (alkáli szilika reakció)
DEF	Másodlagos (vagy késleltetett) ettringit képződés
DEM	Discrete Element Method (Diszkrétéleemes módszer)
FEM	Végeselemes módszer
VEM	Végeselemes módszer
TRM	Tikhonov Regularization Method (Tikhonov-szabályozási módszer)
NMM	Numerical Manifold Method (Numerikus Sokaság Módszer)
RILEM	The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, Építőanyag- és Szerkezetvizsgáló Laboratóriumok és Szakértők Nemzetközi Szövetsége
f_{ct}	a központos húzószilárdság, [MPa]
α	a beton hőtágulási együtthatója, [$1/^{\circ}\text{C}$]
ΔT	hőmérséklet-különbség [$^{\circ}\text{C}$]
E_{ot}	a beton kezdeti rugalmassági modulusa húzásra, [MPa]
A_N	a felület napsugárzásra vonatkozó abszorpciós tényezője,
I_N	a napsugárzás intenzitása,
ΔV	a vizsgált térfogatelem nagysága
$R_{c,m}$	a beton átlagszilárdsága 28 napos korban
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
T_{amp}	a hőmérséklet-változás amplitúdója [$^{\circ}\text{C}$]
t	idő [h]
T_{avg}	a napi középhőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]
C_{viz}	a víz fajhője 4186 [J/(kgK)]
$T_{külső}$	környezeti hőmérséklet [K]
$T(t)$	pillanatnyi hőmérséklet [K]
T_0	kiinduló hőmérséklet [K]
k	hőátbocsátási tényező [W/(m ² K)]
A	felület [m ²]
m	víz tömege [kg]
c_{ch}	cementhabarcs fajhője [J/(kgK)]
m_{ch}	cementhabarcs tömege [kg]
i	mérés száma [db]
$q(t)$	hőtermelés [W/m ³]
ρ_{ch}	cementhabarcs sűrűsége [kg/m ³]
h	konvektív hőtranszport együttható [W/(m ² K)]
a állandó	értéke: 19,24 [$^{\circ}\text{C}$]
b állandó	értéke: -0,3765 [-]
c állandó	értéke: 0,3839 [$^{\circ}\text{Cm}^2\text{K}/\text{W}$]
d állandó	értéke: -0,008659 [$^{\circ}\text{Cm}^4\text{K}^2/\text{W}^2$]

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: Különleges betonok csoportosítása [4] általam bővített
2. táblázat: A betonok legfontosabb jellemzői [4] alapján saját kiegészítésekkel
3. táblázat: A tömegbetonokban kialakuló repedések kiváltó okai
4. táblázat: A habarcs keverék EN 196-1 szabvány szerint
5. táblázat: Alapanyagok arányos átszámítása
6. táblázat: Alapanyagok térfogata

7. táblázat: Hőelemek tulajdonságai
8. táblázat: A vizsgálatoknál alkalmazott anyagok anyagjellemzőinek és peremfeltételeinek összefoglalása
9. táblázat: A szimulációnál alkalmazott betonszerkezet különböző méretei
10. táblázat: A szimulációs kísérletterv faktorok szintjei
11. táblázat: Hőelemek egymástól való eltérései
12. táblázat: A kA szorzat értékei
13. táblázat: A maximális hőmérséklet-különbségek értékei és annak időpontja a modell élhosszainak függvényében
14. táblázat: Az elemzés során kapott állandók értékei
15. táblázat: A vizsgálat eredményeit összefoglaló táblázat
16. táblázat: A 3 illetve 10 méter magas modellek eredményei
17. táblázat: A szimuláció eredményei
18. táblázat: A maximum hőmérsékletek különbsége (vasbeton-beton) adott peremfeltételek mellett az idő függvényében
19. táblázat: A vizsgálat eredményei eltérő mennyiségű betonacélok alkalmazása esetén

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A cement kötésének és szilárdulásának alakulása az idő függvényében [7]
2. ábra: A zöld és a fiatal beton húzási tulajdonságai [8]
3. ábra: A klinker fázisok hidratációs termékének szilárdulási folyamata [11]
4. ábra: Hőfejlődés folyamata a hidratáció során [10]
5. ábra: A vizsgált építmények vázlatos képei: a) alaplemezek, b) betongátak, c) silók/tárolószerkezetek, d) hűtőtornyok, e) szélturbina-alapok, f) cölöpök, g) előregyártott elemek (felső kép: víz alatti alagút, alsó kép: hídpálya), h) védőburkolatok, i) hídpillérek és (j) támfalak [15]
6. a ábra: Tömegbeton szerkezetek mezőkre osztása szimulációs modellezéshez, alaplemez, gerenda [22]
6. b ábra: Tömegbeton szerkezetek mezőkre osztása szimulációs modellezéshez, felmenő falszerkezet [22]
7. ábra: A kéregrepedés fogalma a) egyenlőtlen hőmérséklet a falban; b) a húzó és nyomófeszültségek [4]

8. 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]
9. ábra: A Jinqiao víztározó gát látképe és a végeselemes modell [17]
10. ábra: Feszültségeloszlás a falszerkezetben [13]
11. ábra: Az 1.sz próbadarab automata utókezelő rendszerrel és 2. számú általános utókezeléssel ellátott próbadarab egyszerűsített modelljei [41]
12. ábra: A féladiabatikus modell [68]
13. ábra: A különböző méretű próbatestek és a hőszigetelő réteg méretei [68]
14. ábra: A zsaluzatban elhelyezkedő beton próbatest a talajra elválasztó réteg nélkül telepítve [34]
15. ábra: A végeselemes analízis során kapott hőmérsékleti eredmények a 6. órában, 1 napos és 7 napos beton esetén [34]
16. ábra: A 26.5 x 41.5 x 2 m nagyságú beton alaplemez negyedmodellje [71]
17. ábra: A habarcstartály
18. ábra: EPS tábla vágási terve
19. ábra: A kaloriméter metszetben
20. ábra. A mérési adatgyűjtő összeállítási rajza
21. ábra: A végleges mérési adatgyűjtő összeállítási rajza
22. ábra: Az összeállított mérési konstrukció mérés közben
23. ábra: Duna Dráva Cement Kft.- től kapott cement mintákhoz tartozó vizsgálati eredmény
24. ábra: A CEM III B 32,5 N cement hőtermelése az idő függvényében
25. ábra: A geometriai modell, valamint a kezdeti- és peremfeltételek és hálózás
- 26 a.) és b.) ábra: A talaj és beton szilárdtest egymáshoz képesti elhelyezkedése és hálózása
27. ábra: A modell kiindulási geometriája (bal oldali kép) és hálózása (jobb oldali kép)
28. ábra: A környezeti hőmérséklet változása az idő függvényében.
29. ábra: A nyolcad-modell $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ értékű konvektív hőtranszport együttható értékkel a sárgával jelölt felületeken
30. ábra: A betonacélok elhelyezkedése a nyolcadmodellben
31. ábra: A betonacélok elhelyezkedése a modellben 225 mm és 145 mm osztásközzel
32. ábra: A végeelem modell finomhálózása
33. ábra. Hőmérséklet- idő diagram feldolgozáshoz használt alakja
34. ábra: Hőmérséklet- idő diagram CEM III esetén

35. ábra: Hőtermelés- idő diagram CEM III esetén
36. ábra: A CEM I és a CEM III hőtermelése
37. ábra: A CEM I (bal oldal) és a CEM III (jobb oldal) típusú cementekkel készült beton modellek hőeloszlása $T=20\text{ °C}$ és $h=5\text{ W/(m}^2\text{K)}$ esetén
38. ábra: A CEM I minimális és maximális hőmérsékletének, valamint a hőmérséklet-különbségek alakulása az idő függvényében $T=20\text{ °C}$ és $h=5\text{ W/(m}^2\text{K)}$ esetén
39. ábra: A CEM III minimális és maximális hőmérsékletének, valamint a hőmérséklet-különbségek alakulása az idő függvényében $T=20\text{ °C}$ és $h=5\text{ W/(m}^2\text{K)}$ esetén
40. ábra: A hőmérséklet-változás az idő függvényében hőszigetelt beton $T=20\text{ °C}$ és $h=5\text{ W/(m}^2\text{K)}$ esetén
41. ábra: Az élhossznak a hőmérséklet-különbségre gyakorolt hatása $T=20\text{ °C}$ és $h=5\text{ W/(m}^2\text{K)}$ esetén
42. ábra: Hőmérséklet-változás az idő függvényében $h=15\text{ W/(m}^2\text{K)}$, $T=20\text{ °C}$ esetén
43. ábra: A nyolcad modell szimmetriasíkjában a hőmérséklet eloszlás $h=30\text{ W/(m}^2\text{K)}$, valamint $T=5\text{ °C}$ esetén.
44. ábra: A konvektív hőtranszport együttható alakulása a hőmérséklet-különbség függvényében $T=10\text{ °C}$
45. ábra: A hőmérséklet-különbség alakulása a hőmérséklet függvényében, $h=10\text{ W/m}^2\text{K}$ esetén
46. ábra: A hőmérséklet-különbség, a hőmérséklet és a konvektív hőtranszport együttható kapcsolata (14) szerint
47. ábra: A hőmérsékletek alakulása a beton próbatestben
48. 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
49. ábra: A talajfelszínen kialakuló minimum és maximum beton hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet-különbség alakulása $h=30\text{ W/(m}^2\text{K)}$ esetén az idő függvényében
50. ábra: A talajban kialakuló minimum és maximum beton hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet-különbség alakulása az idő függvényében
51. ábra: A talajban és talajfelszínen kialakuló minimum és maximum beton hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet-különbség alakulása az idő függvényében
52. ábra: A hőmérséklet eloszlás a 3 méter magas modellen
53. ábra: A hőmérséklet alakulása $h=5\text{ (W/m}^2\text{K)}$, $T=5\text{ °C}$ a 10 méter magas modellben a maximális hőmérséklet-különbségnél

54. ábra: A hőmérséklet-változás gradiense a modellben
55. ábra: A beton próbatest hőmérsékleti eloszlása $T=20\text{ °C}$ esetén
56. ábra: A betonban kialakuló hőmérsékletek állandó környezeti hőmérséklet esetén
57. ábra: A betonban kialakuló hőmérsékletek változó környezeti hőmérséklet esetén
58. ábra: A hőmérséklet-különbségek alakulása állandó és változó környezeti hőmérsékletek esetén
59. ábra: A vasbeton modell szimmetriasíkjában a hőmérséklet eloszlás $h=5\text{ W/(m}^2\text{K)}$, valamint $T=30\text{ °C}$ esetén
60. ábra: A minimum és maximum hőmérsékletek alakulása $h=30\text{ W/(m}^2\text{K)}$, valamint $T=5\text{ °C}$ esetén az idő függvényében
61. ábra: A hőmérséklet maximumok hőmérséklet-különbségeinek alakulása az idő függvényében
62. ábra: A vasbeton modell szimmetriasíkjában a hőmérséklet eloszlás $h=5\text{ W/(m}^2\text{K)}$, valamint $T=30\text{ °C}$ esetén
63. ábra: A minimum és maximum hőmérsékletek alakulása $h=30\text{ W/(m}^2\text{K)}$, valamint $T=5\text{ °C}$ esetén az idő függvényében
64. ábra: A minimum és maximum hőmérsékletek, valamint a hőmérséklet-különbség alakulása $h=5\text{ W/(m}^2\text{K)}$, valamint $T=30\text{ °C}$ 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 segítségét, 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.