

Historizáló bérházak belső oldali hőszigetelésének lehetőségei és veszélyei

Szerzők

Gulyás Barna

Gyepes Merse Péter

Tóth Botond

Konzulensek

Dr. Hunyadi Zoltán

Dr. Harmathy Norbert

Külön köszönet:

Dr. Bakonyi Dániel

Nagy Boldizsár

Nagy Márton

Dr. Szeberényi Imre

Absztrakt

Épületeink közel 40%-ban felelősek a világ teljes energiafogyasztásáért és karbon kibocsátásáért: nemcsak építésük, de üzemeltetésük is óriási mennyiségű energiát igényel. Régebbi, mára korszerűtlenné vált épületeink energiafogyasztása kiemelkedően magas, a kedvezőtlen állagvédelmi, épületfizikai és komfort követelmények mellett. A XX. század eleji századfordulós, historizáló épületek mai szemmel nézve rendkívül rossz energetikai mutatókkal rendelkeznek. Kutatásunk a tárgyi épületek épületfizikai és energetikai korszerűsítési megoldásait célozzák meg.

Az energetikai korszerűsítés mögötti motivációk rendkívül sokrétűek: lehet, hogy a komfortérzetet szeretnénk növelni, energiaszámláinkat és/vagy ökolábnyomunkat csökkenteni, de makroszinten az energiafüggőség csökkentése, valamint az energiamix átalakulása is a célkitűzések közé tartozik.

A korszerűsítés eszközei sokfélék lehetnek, ám közös jellemzőjük, hogy összetett, komplex rendszerek telepítését vagy felújítását célozzák, így ezekhez a lakóközösség egyetértésére és közös finanszírozására van szükség.

Kivételt képez ezek közül a belső oldali hőszigetelés, hiszen ez egyénileg kivitelezhető. Dolgozatunkban három különböző, páraáteresztő képességű belső hőszigetelő rendszer és rétegrend hő- és páratechnikai teljesítményét, alkalmazási lehetőségeit és veszélyeit vizsgáltuk meg. A kutatás kitért a csomópontok hőtani elemzésére. A teljesítményt a DELPHIN szimulációs programmal vizsgáltuk meg, a hőnyereséget pedig a Therakles programmal elemeztük.

Vizsgálat eredményei alapján a belső hőszigetelés alkalmazásával a vizsgált szerkezetekben hideg sarkok alakulhatnak ki. Az éves fűtési energiaigény a belső oldali hőszigeteléssel mintegy 20%-kal csökkenthető, a korszerűsítés azonban a jelenlegi lakossági energiaárak mellett 40+ évre tehető.

Tartalomjegyzék

- 1. Bevezetés**
- 2. Irodalmi áttekintés**
 - 2.1. Historizáló társasházak a századfordulóról
 - 2.2. Alapfogalmak bevezetése
 - 2.3. Belső hőszigetelő rendszerek
- 3. Módszertan**
 - 3.1. Szakirodalom feldolgozása és problémafelvetés
 - 3.2. Belső hőszigetelő anyagok, rendszerek kiválasztása
 - 3.3. Rétegrendek
 - 3.4. 1D szimulációk
 - 3.5. 2D szimulációk
 - 3.6. Szimulációk eredményeinek értékelése
 - 3.7. Energiamérleg számítás
 - 3.8. Kivitelezési költségek
 - 3.9. Eredmények összegzése, értékelés
- 4. Eredmények és értékelés**
 - 4.1. Rétegrendek értékelése
 - 4.2. Csomópontok értékelése
 - 4.3. Energiamérleg szimuláció és kivitelezési költségek
 - 4.4. Eredmények értékelése, következtetés
- 5. Összefoglalás**

1. Bevezetés

Épületeink világszerte - és kiváltképp a mi mérsékelt övi éghajlatunkon - a legnagyobb energiakibocsátók közé tartoznak. A lakásokban történik meg a végső energiafelhasználás 27 százaléka ([1] ITM¹, 2021), ráadásul ennek az energiának a 72-74 százaléka fűtécélú ([2] MEHI², 2020), ami EU-s szinten is átlag feletti adat. Ezzel együtt ökölszabályként tudjuk, hogy az a “legzöldebb épület”, ami már megépült, így kerül évről évről egyre inkább előtérbe az energetikai korszerűsítések témája. Ezen a területen jelentős előrelépések felé köteleződünk el: az EPBD³ alapján 2033-ra (szűk kilenc év!) szeretnénk, ha a meglévő épületeink legalább “E” energetikai besorolásba kerülnének - a jelenlegi lakásállomány átlagosan “FF” kategóriájú ([3] HuGBC⁴, 2023), illetve a jelenlegi évi mintegy 1 százalékos éves felújítási rátát 2030-ig 3%-ra szeretnénk feltornászni. A hosszú távú, ambiciózus cél pedig nem más, mint a teljes karbonsemlegesség elérése 2050-re. Világos, hogy a következő évtizedek meghatározó feladata lesz az épületállomány energetikai korszerűsítése.

Jelen dolgozat ennek a rendkívül heterogén épületállománynak egy lényeges típusával foglalkozik: a historizáló társasházakkal. Ezek az épületek Magyarország- és Európa-szerte meghatározzák a nagyvárosi esztétikát, és fontos örökségvédelmi, kulturális és turisztikai értéket képviselnek.

Bár az ide sorolható épületek számára és lakott alapterületére nincs adat, az 1945 előtt megvalósult épületállomány elég pontos információink vannak - feltételezzük, hogy ezek többsége historizáló lakóépület.

lakások száma	épületek, db (2011)	lakott lakások, db (2020)	lakott alapterület, m2 (2020)
4-9	15 889	72 027	3 961 485
10+	9 417	179 424	10 406 592

Forrás: ITM, 2021

Ez az összes Magyarországon 1945 előtt épült lakóépületek a 21%-a ([4] Gevorgian, 2021).

A korszerűsítés építészeti és épületgépészeti eszközei sokfélék lehetnek:

- külső vagy belső oldali hőszigetelés
- nyílászáró felújítás vagy csere
- zárófüdém, lábazat, tetőszerkezet hőszigetelése

¹ Információs és Technológiai Minisztérium

² Magyar Energiahatékonysági Intézet

³ Energy Performance of Buildings Directive

⁴ Magyar Környezettudatos Építés Egyesülete

- fűtési rendszer felújítása
- hűtési rendszer felújítása
- használati melegvíz-rendszer felújítása
- szellőzőrendszer felújítása
- megújuló energiaforrás telepítése
- árnyékolórendszer telepítése

A fenti munkálatokat két lényeges hátráltató tényező jellemzi: drágák és a megvalósításukhoz a tulajdonosok együttes erőfeszítésére van szükség. Egyrészt azért, mert osztatlan közös tulajdonon végzett munkálatokról van szó, például zárófödém hőszigetelése esetén, másrészt, mert rendszerszintűen érinti az épület üzemeltetését (lásd fűtése korszerűsítés). Feltételezésünk, hogy ez az organizációs és pénzügyi akadály hátráltatja a korszerűsítési törekvéseket.

További komoly kihívást jelenthet az épület építészeti értékeinek védelme. Sok budapesti - és Európa más nagyvárosaiban található – lakóépületnél alapvető szempont a díszes ornamentika, korabeli közösségi terek, építészeti értékes arányok, részletképzések megőrzése. Ez a múlt századfordulót jellemző historizáló társasházakra gyakorlatilag kivétel nélkül jellemző.

A belső hőszigetelés alkalmazása a fenti nehézségeket megkerüli, hiszen ezeket műemléki védettségi homlokzatokkal rendelkező épületeken is lehet alkalmazni, és akár lakásonként, egyénileg is kivitelezhetőek.

A hőszigetelés belső oldalra való helyezésével azonban újabb épületfizikai és épületszerkezettani kihívások elé nézünk. Nyilvánvaló előny a fűtési energiamegtakarítás, azonban nyáron hőtároló tömeget veszítünk, télen pedig lassítjuk a fal száradását, potenciális fagykárnak kitéve a külső határoló szerkezetet. A veszélyek alapján kijelenthető, hogy a belső hőszigetelő rendszerek alkalmazásához pontos vizsgálatokra van szükség.

Hipotézis

Hipotézisünk úgy szól, hogy *a belső oldali hőszigetelések megoldást jelenthetnek historikus társasházak energetikai korszerűsítésében.*

A dolgozat határai

A belső hőszigetelő rendszerek kínálata és alkalmazása jelentős terület, így dolgozatunkban ennek csak bizonyos részével tudunk foglalkozni. Fókuszunk a jelentős építészeti értéket képviselő historizáló társasházakon van. Így nem foglalkozunk a belső hőszigetelő rendszerek más lényeges alkalmazási területeivel, például templomok, kastélyok, villák és egyéb műemlékek vizsgálatával. Továbbá, egy reprezentatív belvárosi bérházban rengeteg fontos szerkezetcsatlakozás van, aminek következetes átgondolása szükséges egy eredményes felújításhoz. Mi most arra vállalkozunk, hogy megvizsgáljuk az általános falfelület, a födémcsatlakozás, a lakáselválasztó fal és az ablak körüli csomópontokat, mindezt az utca felőli homlokzaton. Terjedelmi okokból nem tárgyaljuk tehát a függőfolyosók, lépcsőházak, csatlakozó átriumok és pincék által támasztott feladatokat sem.

Rövid áttekintés

A következőkben először röviden bemutatjuk a vizsgált épülettípust és szerkezetei sajátosságait, és bevezetjük a kutatás során használt alapfogalmakat. Ezután kijelöljük a vizsgálati szempontrendszert és a hozzá tartozó módszertanunkat, bemutatjuk a használt számításokat és szimulációs szoftvereket, valamint a vizsgált rétegrendeket. Végül bemutatjuk az eredményeinket, és értékeljük azokat a felállított szempontrendszer alapján.

2. Irodalmi áttekintés

Historizáló lakóépületek a századfordulóról

A 19. században a kiegyezés és a városegysítés hatásaitól fűtve Budapest óriási változásokon ment keresztül: 1868 és 1910 között a népességszám 280 ezerről 880 ezerre ugrott. Ezekben az években nyitották meg beépítésre a mai Józsefváros, Erzsébetváros és Terézváros utcáit, és szerte Budapesten rengeteg bérház-beruházás valósult meg ([5] Körner, 2015).

Épületszerkezetek

Az épület tartószerkezeteire a nagy fajlagos tömeg és robosztus méretek jellemzőek. Ebből adódóan pozitív tulajdonságuk a nagy hőtároló kapacitás és páracsilapító képesség, valamint kedvező hangszigetelési adottságok.

A falazat egyrétegű vakolt szerkezet, mely kis- vagy nagyméretű tömör téglából és kétoldali vakolatból áll. A téglafal vastagsága alsóbb szinteken 64-90 centi, és jellemzően

kétszintenként egy féltéglával, néha egész téglával csökken, így a legfelsőbb szinteken 38-51 centire csökken. A vakolás vastagsága jelentősen változik 1-5 cm között. Míg a falazat hőtároló képessége kiváló - így kellemes klímát biztosítva a nyári időszakban, hőátbocsátó képessége mai szemmel nézve kifejezetten magas: $U \approx 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ ([4] Gevorgian et al, 2021).

A födémek jellemzően acélgerendás - orrtéglás, kerámia béléselmeles födémek, de régebbi (~1870 körül) épületekben előfordulhatnak fafödémek is, amit később vasbeton gerendásra cseréltek, vagy acélgerendával dúcoltak alá ([6] Perényi et al, 2016).

Homlokzati nyílászárók kapcsolt gerébtokos szerkezetűek, melyek anyaghasználata és geometriája nagyban meghatározza az épület megjelenését. Árnyékolásuk az utcai homlokzatokon esslingeni típusú redőnyökkel megoldott. Vizsgálatunkban a homlokzati nyílászárók tulajdonságait Szűts et al.: Történeti ablakok hőtechnikai tulajdonságai című kutatása alapján határoztuk meg. A feltételezéseink szerint az ablakok nem passzívításra szorultak és 70%-os üvegezési aránnyal rendelkeznek, így $U_w \approx 4 \text{ [W/m}^2\text{K]}$.

A termikus burok további szerkezetei a nagyfelületű vakolatlan tűzfalak, légudvarok, lépcsőházfalak, záró- és pincefödémek. Ezeket dolgozatunkban nem tárgyaljuk, modellünkben pedig olyan lakást vizsgáltunk, ami nem csatlakozik ilyen szerkezetekhez.

A házak gyakori problémái a jelentősen leromlott állagú homlokzat, a talajvíz elleni szigetelés hiánya, illetve a fűtésrendszerek mohó energiafelhasználása. Jelentős hőhidakat képeznek a redőnyszekrények, erkélylemezek és függőfolyosók.

A továbbiakban bevezetjük a dolgozatban használt fontosabb alapfogalmakat.

Alapfogalmak bevezetése

Hővezetési tényező

Anyagjellemző, amely megmutatja, hogy egységi hőmérséklet-gradiens hatására egységnyi felületen mekkora hőmennyiség halad át az adott anyagon egységnyi vastagságán. Jele: λ . Mértékegysége: W/mK . Az anyag porozitása, nedvességtartalma és hőmérséklete függvényében változik, így csak ezek adott értékeire érvényes ([7] Fekete, 1985).

Hőátbocsátási tényező

Leírja, hogy az (összetett) szerkezet egységnyi felületén egységnyi hőmérséklet-gradiens hatására mekkora hőmennyiség halad át. Jele: U . Mértékegysége: $\text{W/m}^2\text{K}$. A következő összefüggéssel fejezzük ki:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{se} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_i}{\lambda_i} + \dots + R_{si}}$$

Kondenzáció

A falszerkezetben áramló pára természetes jelenség, problémát azokban az esetekben jelent, ha a szerkezet egy adott pontjában az adott hőmérsékleti értékhez kapcsolódó telítési párányomás a pára-résznyomás értékével megegyezik, vagy az alá csökken, mivel ezáltal kondenzáció (párakicsapódás) jön létre a szerkezetben vagy annak felületén, melynek következtében az vizesedni kezd. A vizesedés a hővezetési képesség javulásának negatív hatása mellett a levegővel érintkező felületek esetében a penészgomba képződés melegágya lehet, téli időszakokban pedig a falazat kifagyásához vezethet.

Páradiffúziós tényező

Megmutatja, hogy egységnyi parciális nyomáskülönbség hatására egységnyi idő alatt mennyi vízgőz halad át egységnyi vastagságú anyag egységnyi felületén. Jele: μ . Mértékegysége: g/msMPa.

Páradiffúziós ellenállási szám

Megmutatja, milyen vastag anyag páradiffúziós ellenállása egyenlő egy méter levegő ellenállásával.

Hőhíd

Hőhídnak nevezzük a határoló szerkezet minden olyan pontját, ahol többdimenziós hőáramlás és hőmérséklet-eloszlás alakul ki ([7] Fekete, 1985), vagyis ahol az épület fűtésére felhasznált hőenergia az átlagostól nagyobb mértékben távozik.

Az energiaveszteség mellett a jelenség további következménye, hogy ezeken a helyeken jelentős mértékben lecsökken a belső felület hőmérséklete. Az ilyen felületekkel érintkezve a belső, meleg levegő páratartalma kicsapódik. Ez egyrészt az épületszerkezetek

vizesedéséhez és így hosszú távú károsodásához vezethet, másrésztől melegágyat szolgáltathat a penészgomba számára.

Előfordulásuk a szerkezeten belül a fűtött és fűtetlen részeket összekötő, magas hővezetésű épületszerkezetekre jellemző. Jelenlétük megkerülhetetlen, azonban a megfelelő intézkedések mellett nagyságuk és mennyiségük csökkenthető, amely által energiahatékonyabbá tehetjük épületeinket, ugyanakkor a ház szerkezetét meg tudjuk óvni a további károsodástól, és egészségesebb lakókörnyezetet tudunk biztosítani.

Belső hőszigetelő rendszerek

A belső hőszigetelő rendszerek speciális megoldást jelentenek a hőszigetelő rendszerek terén, így felhasználásuk is speciális helyzetekre korlátozódik. Jellemzően olyan épületek esetében kerülnek beépítésre, ahol a hőszigetelés valamilyen lényeges szempont miatt (pl. speciális építészeti kialakítás, védett homlokzat) a külső homlokzaton nem kerülhet elhelyezésre.

A belső oldali hőszigetelések épületfizikai működésük tekintetében jelentősen eltérnek a külső oldali hőszigetelésektől. Tekintettel arra, hogy alkalmazásuk épületfizikai problémákat eredményezhet, *hőtechnikai*, valamint *nedvességvédelmi és páratechnikai* szempontból vizsgáljuk működésüket.

Hőtechnika

A külső oldali hőszigeteléshez hasonlóan a belső oldali rendszerek is más viselkedést mutatnak a téli, illetve a nyári időszakban. Az eltérő szezonális működést az alábbiakban ismertetjük, majd pedig röviden tárgyaljuk a belső szigetelésnél fellépő hőhíd kockázatokat.

Téli időszak

A belső oldali hőszigetelések jóval gyorsabb felfűtést tesznek lehetővé a szigetetlen falszerkezetekhez/külső oldali hőszigetelésekhez képest: az utóbb említett két szerkezet esetében először a falat kell "felfűteni" a hőtároló tömegük aktiválásához, hogy a belső felületük megfelelő hőmérsékletet érjen el. A belső oldalon elhelyezett hőszigetelés esetében a szigetelés gyenge hővezetési tényezőjéből adódóan a hő legnagyobb része közvetlenül a helyiségben marad. ([8] Ingo et al. 2013)

Nyári időszak

A nyári időszakban a belső oldali hőszigetelés a külső oldalnál alapvetően rosszabb teljesítményt nyújt: nem tud érvényesülni a falak hőcsillapító hatása, ugyanakkor a kívülről beérkező hőszugárzás a korábban említettek alapján jóval gyorsabban melegíti fel az adott helyiséget egy klasszikus falszerkezet által határolthoz képest ([9] Energie-experten.org, 2024).

Klímával szerelt helyiségekben azonban előnyt jelenthet, hogy mivel a falszerkezetet nem kell lehűteni, potenciálisan gyorsabban lehűthető a helyiség. Ennek a felderítése azonban további vizsgálatot igényelhet.

Hőhíd kockázatok

Belső oldali hőszigetelések esetében a rosszul megtervezett és elkészített szerkezetcsatlakozások kifejezetten ronthatnak a szerkezet épületfizikai jellemzőin. A fal- és földemcsatlakozások és a kivitelezési technológia egyaránt rejthet buktatókat.

Ezeknél a csatlakozásoknál a felújítatlan épületek esetében is fennálló, különösebb veszélyt nem jelentő lineáris hőhidak a belső oldali hőszigetelés beépítése által jelentős mértékben felerősödnek, hiszen a létrejött új, belső termikus burok ezekben a sávokban megszakításra kerül. Éppen ezért jelentős hőveszteség megy végbe rajtuk keresztül, melynek következtében a csatlakozás körüli felületek - az élek, a 3D sarkok (például egy földem - belső fal - külső fal csatlakozás), valamint az ezekhez tartozó belső falfelületek erősen lehűlhetnek, amely megnöveli a penészképződés kockázatát. ([10] Oswald et al., 2011)

Nedvességvédelem, páratechnika

Mivel a téli időszakban a külső határoló falak elzárásra kerülnek az adott helyiség hőjétől, nem melegszenek át megfelelőképp, amiből kifolyólag a száradásuk csak korlátozott mértékben zajlik le ([10] Oswald et al., 2011): a nagyobb mértékű nedveségtartalomból adódóan részben veszítenek hőszigetelő képességükből, a szerkezeten belül tartósan fagyponthoz alatti hőmérsékletek esetén fagykár keletkezhet, ugyanakkor a külső oldalon penészképződés is indulhat be.

Mindemellett a beljebb került harmatpont miatt a falszerkezet és a szigetelés között egy gyakorlatilag állandóan nedves zóna alakul ki, mely hozzájárulhat a további, nedvességhez kötődő károsodások kialakulásához. Így amennyire lehetséges, a szerkezetek nedvességfelvételét korlátozni, illetve a megfelelő mértékű kiszáradásukat biztosítani kell.

Csapóeső elleni védelem

Alapvetően minden falszerkezet képes bizonyos mennyiségű víz felvételére az azt érő csapóesőből ([11] sanier.de, 2024). Ez a szigetetlen falból könnyen el tud párologni a napsütés, száraz levegővel való érintkezés, valamint a belső oldalról származó melegebb levegő hatására. A belső irányba történő korlátozott száradási lehetőség miatt a szigetelendő falszerkezet csapóeső elleni védelmét minden esetben meg kell vizsgálni, és amennyiben szükséges, azt a megfelelő védelemmel ellátni. ([12] Wolf U., 2022)

Légzárás

Ahogy már említettük, a külső, határoló falszerkezet belső oldalán általánosságban véve magas a nedvességtartalom. Amennyiben a hőszigetelő rendszeren, vagy a falszerkezeten fennálló hiba következtében a légzárás nem tökéletes, annyiban a szerkezetbe beáramló külső vagy belső levegő penészpórákat juttathat ezen kritikus zónába, mely a szigetelés mögött penészesedést eredményezhet. Hideg idő esetén pedig annak páratartalma is kicsapódhat, mely további károkat, illetve megfelelő életfeltételeket biztosíthat a penészgombák számára. Ezért a telepítés előtt minden esetben szükséges a megfelelő külső és belső légzárás vizsgálata, valamint kialakítása. ([10] Oswald et al., 2011)

Külső légzárás

A fal hézagain keresztül bejutó külső levegő páratartalma már a falszerkezeten belül is kondenzálódhat. Megfelelő védekezést a falszerkezet légáteresztő fugáinak kitöltése, valamint - ha a homlokzati kialakítás megengedi - kétoldali légzáró alapvakolat elhelyezése jelentheti. ([10] Oswald et al., 2011)

Belső légzárás

A belső levegő hőszigetelés mögé jutását a hátszerkezet nem megfelelő kivitelezése (egyenetlen aljzat, pontonként ragasztott hőszigetelés), valamint a hőszigetelő táblák szakszerűtlen összeillesztése is eredményezheti. Amennyiben más lehetőség nem nyílik, a táblák közötti hézagot légzáró, és rendszertől függően párazáró vagy páraáteresztő tulajdonságú anyaggal kell kitölteni. A belső oldalon párazáró vagy párafékező fóliával ellátott rendszerek esetében ez a réteg képezi a légzáró réteget is. ([10] Oswald et al., 2011).

Csoportosítás páraáteresztő képesség szerint

A belső oldali hőszigetelési rendszerek alkalmazását alapvetően meghatározza páraáteresztő képességük. Ez alapján három csoportot:

- *páraáteresztő,*
- *párazáró,*
- *és párafékező*

rendszereket különböztetünk meg.

Páraáteresztő rendszerek

A páraáteresztő szigetelések - a szigetelőanyag kapacitásától függően - a belső helyiség levegőjének páratartalmát képesek felvenni és továbbítani. Ennek következményeképp, amennyiben az adott helyiség páratartalma túl nagy, a többletpára a hőszigetelésen keresztül el tud távozni. Mindez fordítva is igaz, így a külső falszerkezet a nyári időszakban a belső tér felé is képes leadni a nedvességtartalmát, így korlátozott mértékben, de ebbe az irányba is képes száradni.

Páraáteresztő szigetelések lényeges alcsoportja az ún. '*kapilláris aktív*' szigetelések. Ezek az anyagok felépítésükből adódóan a felvett pára jelentős hányadát ideiglenesen hajszálcsoveikben tárolják el, majd azt az érkezési oldalra juttatják vissza - így képesek szabályozni a relatív belső páratartalmat. Ugyanakkor nagyobb mennyiségű pára esetén - jellemzően a fűtési szezonban - nem gátolják a többlet falszerkezetbe történő továbbáramlását.

Kivitelezésük szempontjából fontos, hogy teljes felületen kell ragasztani őket rendszerhez passzoló, a hőszigeteléshez képest magasabb hővezetési tényezővel és páradiffúziós ellenállással, valamint alacsonyabb vízfelvételi képességgel rendelkező ragasztóanyag segítségével. Ennek köszönhetően a ragasztó meggátolja, hogy a páradiffúzió a hőszigetelés és a falszerkezet között és/vagy a falszerkezetben történjen meg, ezáltal a rendszer visszaszállítja a kondenzvizet a belső felületre. A ragasztó alacsony vízfelvételének köszönhetően pedig a kicsapódott vizet többnyire a hőszigetelés veszi fel.

Felhasználásuk alacsonyabb páratelhelésű terek esetében ajánlott. A hő- és nedvesség tárolásra képes anyagok (pl. vályog ill. farost/fagyapot) jó hatással vannak a helyiség klímájára, és így a komfortérzetre is ([13] Gregor et al., 2023; [14] V.d.L., 2021).

Páraáteresztő belső hőszigetelő rendszerek készülhetnek kalcium-szilikát táblákból, farostból és duzzasztott perlitből is.

Párazáró rendszerek

A párazáró rendszerek teljes mértékben gátolják a pára hőszigetelésbe jutását, ezért nem teszik lehetővé a falszerkezet belső tér felé történő kiszáradását sem.

Mivel a belső felületükön nem megy végbe semmilyen páradiffúziós folyamat, azok - a megfelelő aljzatszerkezettel - burkolat szempontjából szabadon alakíthatóak, így például csempék is felhelyezhetőek rájuk. Felhasználásuk nedvességgel és/vagy párával erősen terhel terek, mint például jelentősebb méretű konyhák és vizes helyiségek, vagy uszodák esetében történik. ([15] Worch, A. 2021).

Párazáró rendszer készülhet habüveg táblákból vagy például vákuumpanelből.

Párafékező rendszerek

A párafékező rendszerek a páraáteresztő, illetve a párazáró rendszerek tulajdonságait vegyítik. Alapvetően párazáró tulajdonságúak, nedvesség felvételére egyedül akkor képesek, amikor a szoba levegőjének páratartalma túl magasra válik. Ebből fakadóan a falszerkezet csak korlátozott mértékben képes a belső oldal felé kiszáradni, és akkor is csak jellemzően a nyári időszakban. ([16] Worch, A. 2021)

Rendszertől függően vagy maga a szigetelőanyag, vagy pedig egy, a szigetelőanyag szoba felé eső felületén elhelyezett párafékező réteg lesz a felelős a párafékezésért. Mivel a belső felületen nem zajlik aktív páratranszport, így a felület szabadon alakítható, burkolható.

Felhasználásuk olyan helyiségek esetében javasolt, ahol a páratartalom időszakosan magas értéket ér el, (pl. konyha, fürdő, hálószoza) és ahol így a felesleget a rendszer képes felvenni.

Párafékező rendszerek készülhetnek például OSB lapokból, vagy párafékező fóliával ellátott közetgyapotból.

Felhasználás

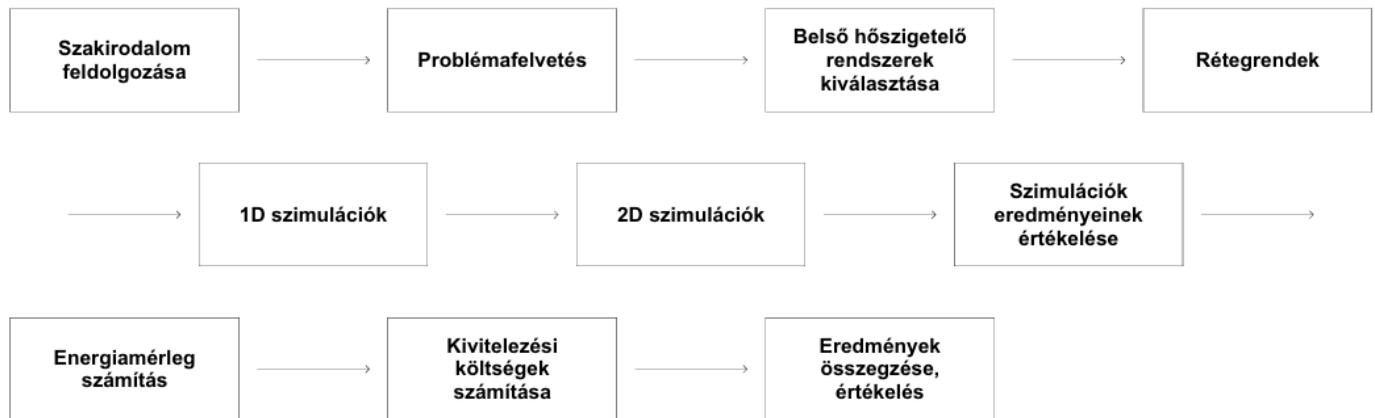
Mivel jellemzően speciális esetekben alkalmazzuk őket, szabványok nem szabályozzák tervezésüket és kivitelezésüket. Ökölszabályként azonban megfogalmazható, hogy rendszertől függően 3-8 cm vastagságban tervezendők ([17] Ruisinger & Grunewald, 2009), mert ezzel már jelentősen javítható a falszerkezet hőátbocsátási tényezője, lényeges komfortérzet javulás érhető el, és viszonylag keveset vesz el a szoba hasznos alapterületéből.

A belső hőszigetelő rendszerek bemutatása után tárgyaljuk a vizsgálat szempontjait és a kutatás módszertanát.

3. Módszertan

Ebben a fejezetben bemutatjuk a kutatási folyamatot, és részletesen tárgyaljuk a vizsgálat és kiválasztás szempontjait.

Kutatásunk bemutatásához a következő folyamatábrát készítettük:



Szakirodalom feldolgozása és problémafelvetés

Az első lépéseket a - többségében német nyelvű - szakirodalom feldolgozása jelentette. Németországban a belső hőszigetelő rendszer alkalmazása járatos megoldás műemlékvédelmi feladatoknál, ezért sok fontos anyag született az országban erről. Másik fontos szakirodalom volt a magyar, historizáló bérházakról szóló megannyi anyag. Ezek alapján rájöttünk, hogy még nem készült anyag a belülről szigetelt, 2D-s szerkezetekről, illetve ezek szimulációjáról.

Így kezdett körvonalazódni a feldolgozandó probléma: hogyan működnek a belső hőszigetelések, és hogyan nem? Milyen lehetőségeket és veszélyeket rejt az alkalmazásuk? Továbbá, ha valóban alkalmazhatóak lényeges kockázatok nélkül, megéri-e egyáltalán felépíteni őket? Mennyi pénzt hoz és mennyit visz el telepítésük? Ezeket a kérdéseket kezdtük el felfejteni.

Belső hőszigetelő anyagok, rendszerek kiválasztása

A német nyelvű szakirodalom alapján rendelkezésre állt egy lista azokról az anyagokról, amiről már van némi tapasztalat. Úgy döntöttünk, hogy ennek egy kisebb részét akarjuk alaposan megvizsgálni.

A következő szempontok alapján választottunk:

- *meglévő szerkezetek állagmegóvása* - vizsgált épületeink falszerkezeteit korukból adódóan állagmegóvásban kell részesítenünk, melyben egyebek mellett a belső oldali hőszigetelésnek is jelentős szerep jut. A legnagyobb problémát a fal vizesedése jelenti, ezért fontos, hogy az általunk választott hőszigetelő rendszerek maguk is hozzájáruljanak a falszerkezet aktív száradásához.
- *megújuló anyagok* - a piacon a rendelkezésre álló anyagok közül olyanokat választottunk, amelyek a kapcsolódó segédszerkezeteikkel együtt újrafelhasználható és/vagy lebomló anyagokból készülnek.
- *Magyarországon való elérhetőség* - Az általunk választott rendszerek - adott esetben több cég kínálatában is - mind elérhetőek a hazai piacon. Ez dolgozatunk lényeges eleme, hiszen célunk, hogy az itthoni energetikai korszerűsítésekhez kínáljunk megoldási lehetőséget.
- *páraterhelés mértéke* - Utcai homlokzatra eső szobákban gondolkodtunk, így feltételeztük, hogy szélsőséges páraterhelési helyzet nem fordul elő, ami például egy párazáró rendszer használatának szükségességét vonná maga után. Ezért két páraáteresztő, illetve párafékező anyagokat kerestünk.

A fenti szempontok alapján három anyagot azonosítottunk, amikhez gyártót és konkrét termékeket is kapcsoltunk. Ezek a következők:

- kalcium-szilikát - Multipor
- farost - Steico Internal
- fűjt cellulóz - Steico Floc

A továbbiakban részletesen mutatjuk be a választott anyagokat, illetve rendszereket.

Multipor ásványi hőszigetelő lap

A Multipor hőszigetelő lap tisztán természetes ásványi anyagok felhasználásával készül, úgy, mint a homok, a mész és a víz. Anyagszerkezete porózus, jó hőszigetelési tulajdonságát is ez adja, ugyanakkor kellőképp tömör, nyomásálló és alaktartó. Mindemellett a helyszínen is könnyen alakítható (akár ívesen is), kézi fűrésszel egyszerűen méretre vágható. Lúgos kémhatásából adódóan megakadályozza a gombák és penészpórák elszaporodását,

ugyanakkor a gyártási folyamat végén vízüveggel való impregnálás következtében víztaszító tulajdonságú. Ez utóbbi nem ront azonban a termék kapilláraktív tulajdonságain, csupán annak nedvszívó képességét csökkenti.

Műszaki adatok



3.1 ábra. Multipor felhelyezése

Hővezetési tényező (λ)	0,047 W/(mK)
Páradiffúziós ellenállás (μ)	3
Tűzállósági besorolás (EN 13501-1)	A1, nem éghető
Testsűrűség	115 kg/m ³

Alkalmazástechnikai sajátosságok

Az előkészítő munkák során nagy figyelmet kell fordítani belső falfelület szennyeződéseinek eltávolítására, hiszen ezek szervesanyag tartalmuk következtében a penészgombának nyújtanak táptalajt. Mindemellett amennyiben szükséges, fontos az aljzat felületkiegyenlítése.

A hőszigetelő lapok rögzítése rendszersaját ragasztóhabarccsal azok teljes felületén történik. Ez biztosítja azok kellő szilárdságú tapadását, valamint azt, hogy a falszerkezet és a hőszigetelő lapok között ne alakuljanak ki ún. “bezárt légrések”, amikben adott esetben páralecsapódás történhet. Hogy a felület együtt dolgozása és mechanikai ellenállása jobb legyen, üvegszövet háló és Multipor habarcs felhasználásával teljes felületű ágyazó réteg kialakítása szükséges.

A páraáteresztő képességet még nem rontva a felületen kisebb kiterjedésű párazáró burkolatok (pl. csempe, kőlap) elhelyezhetők. Ebben az esetben azonban az érintett területeken a hátszerkezet dübelezése szükséges ([18] Xella, 2024).

Anyagköltségek

Anyagok	Egységár (a kiszerezés függvényében)	Anyagszükséglet/m ²	Ár/m ²
Multipor 80 ásványi hőszigetelő lap v = 80 mm	600 x 400 x 80 mm tábla A = 0,24 m ² ~ 2740 Ft/tábla	~ 4,16 tábla	11400 Ft
Multipor ragasztóhabarcs	20 kg-os zsák ~ 15 400 Ft/zsák ~ 770 Ft/kg	~ 4 kg (ragasztáshoz) ~ 2 kg(ágyazó réteghez)	4620 Ft
Üvegszövet háló	~ 350 Ft/m ²	1 egység	350 Ft
Polifoam elválasztó habszalag (10 mm)	~100 Ft/m ²	1 m	100 Ft
Összesen:			16830 Ft

Steico Internal farost hőszigetelő lemez

A hőszigetelő lemez alapanyaga a fa megmunkálásának során létrejövő, másra nem használható nyesedék. Ezt gőzölés után rostokra bontják, majd ebből nedves eljárással készítik a szilárd lemezeket. A megfelelő szilárdságot kizárólag a fa saját kötőanyaga, a lignin biztosítja. A táblák megfelelő rugalmasságának biztosítása végett csekély mennyiségű szintetikus textilszál is hozzáadnak, további adalékanyagoktól azonban mentes a termék.



Az összetételéből adódóan igen kedvező épületfizikai tulajdonságokkal rendelkezik. A német Fraunhofer Institut által végrehajtott épületfizikai vizsgálatok megállapították, hogy a farost hőszigetelő lemezek képesek a legtöbb felvett nedvességet ideiglenesen tárolni a páraáteresztő belső oldali hőszigetelő lemezek közül ([10] Oswald et al., 2011). Ez kiegészülve a lemezek kapilláraktív tulajdonságával kitűnő páraszabályozó képességet jelent, ami aktívan hozzájárul a penészgomba képződés elkerüléséhez, az ideiglenes, jelentősebb páratelhelések esetében is (pl. főzés vagy zuhanyzás).

Fontos kérdés a tűzvédelem: a farostlemezek ugyan éghetőek, azonban összetételüknek köszönhetően nagyban hozzájárulnak ahhoz, hogy a tüzesetek a lehető legkevesebb kárt okozzák. Tűzzel való érintkezés során az anyag felületén egy vékony, elszenesedett réteg jön létre, mely megakadályozza az anyag gyors keresztül égését, valamint a gyors felületi tűzterjedést, így a rendszer viselkedése a tüzeset kezdetén jóval kiszámíthatóbb lesz, ami a menekítést megkönnyíti. Az ellenállóképesség eléréséhez a lemezek egyéb vegyi anyaggal nem kerülnek kezelésre ([19] Steico, 2023).

Műszaki adatok

Hővezetési tényező (λ)	0,038 (W/mK)
Páradiffúziós ellenállás (μ , 80 mm)	5
Tűzállósági besorolás (EN13501-1)	E
Testsűrűség	160 (kg/m ³)

Alkalmazástechnikai sajátosságok

Más, táblás belső oldali hőszigetelésekhez hasonlóan itt is kiemelten fontos az aljzat egyenletességének biztosítása.

A táblák helyszínen alakíthatóak, azonban csak körfűrész segítségével. Azok rögzítése a hátfelületükre, valamint az aljzatra felvitt mész vagy vályogvakolat segítségével, valamint utólagos dübelezéssel, műanyag dübelek segítségével történik. A dübelezés megkezdése előtt, amennyiben a felület egyenetlen, annak csiszolása szükséges. A végső felületképzés kialakításához a táblák ragasztásához felhasznált vakolat, valamint egy rétegben abba integrált üvegszövet háló kerül felhasználásra ([20] Steico, 2024).

A két említett vakolat típus közül bármelyik szabadon választható, a legfontosabb, hogy az jó párovezetési tulajdonságokkal rendelkezzen. A vályogvakolat ugyan költségesebb, használata azonban környezetvédelmi szempontból jobb, ugyanakkor a szigeteléssel rendszerként együtt működve jóval kellemesebb beltéri klímát tud biztosítani.

Anyagköltségek

Anyagok	Egységár (a kiszereles függvényében)	Anyagszükséglet/m²	Ár/m²
Steico Internal farost hőszigetelő lemez v = 8 cm	1200 x 380 x 80 mm tábla A = 0,46 m ² kb. 5750 Ft/tábla	kb. 2,2 tábla	12 450 Ft
Műanyag dübel	kb. 160 Ft/db	4 db	640 Ft
Üvegszövet háló	kb. 350 Ft/m ²	1 egység	kb. 350 Ft
Mészvakolat	kb. 90 Ft/kg	kb. 13 + 13 kg (ragasztáshoz és ágyazó réteghez)	2340 Ft
Vályogvakolat	kb. 217 Ft/kg	kb. 15 + 15 kg (ragasztáshoz és ágyazó réteghez)	6510 Ft
Összesen	(vályogvakolattal)		19975 Ft
Összesen	(mészvakolattal)		15805 Ft

Steico Floc fűjt cellulóz hőszigetelés

A fűjt cellulóz hőszigetelés manapság elsősorban tetőszerkezetek hőszigeteléseként kerül felhasználásra, ugyanakkor jó klímaszabályozó tulajdonságainak köszönhetően belső oldali hőszigetelésként is működik. Alapanyaga használt, apróra vágott újságpapír, ami porszerű anyagot képez. Ez kerül befűjtésre a szigetelendő szerkezetek előtt elhelyezett tűzvédelmi gipszkarton lemezek (tűzvédelmi osztály min. A2) által határolt zsaluendszerbe. A tűzvédelmi gipszkarton lemezek hátoldalára adaptív párazáró fólia kerül elhelyezésre. Erre a párafékező rétegre azért van szükség, mert a cellulóz hőszigetelés csak korlátozott mennyiségben képes vizet felvenni. Éppen ezért kiemelten fontos a kivitelezés előtt egy szakértő által felméréseket végezni a falszerkezet aktuális és a beépítés utáni várható

nedvességtartalmára vonatkozólag. Túlzott vízfelvétel esetén az anyag összezsomósodik és bepenészedik.

A nehéz hozzáférhetőség miatt az ablakkávákat táblás lemezek segítségével kell hőszigetelni. Többféle anyag is felhasználható, a legjobb azonban a farostlemez lehet, mivel az jó klímatechnikai tulajdonságai mellett környezetbarát is.



Műszaki adatok

Hővezetési tényező (λ)	0,038 (W/mk)
Páradiffúziós ellenállás (μ)	1-2
Tűzállósági besorolás (EN13501-1)	E
Testsűrűség (kg/m ³)	35-45

Alkalmazástechnikai sajátosságok

A zsalurendszer függőleges tartóbordáit fából, vagy jobb hőszigetelési igény mellett farost, illetve EPS/XPS lécekből készíthetjük. A párafékezési, valamint légzárási igény miatt fontos, hogy a felhelyezett OSB lapok között megfelelő tömítést alkalmazzunk, ezt valamilyen diffúziónyitott tömítőszalag segítségével érdemes megtennünk. A gipszkarton lemezeket pedig az ablakkávéba is be kell fordítani, így biztosítva a kávébéli szigetelő lemezek tűzvédelmét.

Anyagköltségek

Anyagok	Egységár (a kiszerelés függvényében)	Anyagszükséglet (/m ²)	Ár (/m ²)
Fújó cellulóz hőszigetelés	Anyag + munkadíj (csak a befújásé)	1 egység	2900 Ft
Tartóváz (XPS stafnikból)	~ 1700 Ft/fm	~ 2 fm	3400 Ft
adaptív párazáró fólia (pl.: Isover Vario Xstrasafe)	60 m ² -es tekercs ~ 60000 Ft	1 m ²	~1000 Ft

Tűzvédelmi gipszkarton lemez v = 15 mm	1250 x 2000 x 15 mm tábla A = 2,5 m ² ~ 3200 Ft/tábla	~ 0,4 tábla	1280 Ft
Összesen:			8580 Ft

Az I. melléklet tartalmazza a belső hőszigetelő anyagok részletes műszaki adatlapjait.

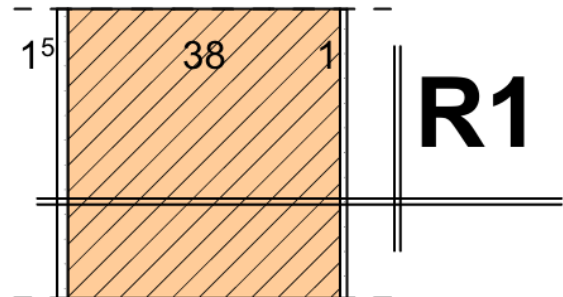
Rétegrendek

A választott hőszigetelő rendszerekből rétegrendeket alkottunk. Itt fontos megemlíteni, hogy kutatásunkban minden rétegrendet és szimulációt egy hőszigetelés vastagsággal terveztünk meg, nyolc centiméterrel. Ezt a szakirodalom feldolgozása után választottuk ki, mert úgy láttuk, hogy ezzel már lényeges hőátbocsátási tényező javulást érhetünk el ([15] Ruisinger, U., & Grunewald, J., 2009).

Négy rétegrendet vizsgáltunk meg:

R1 - Szigeteletlen falszerkezet

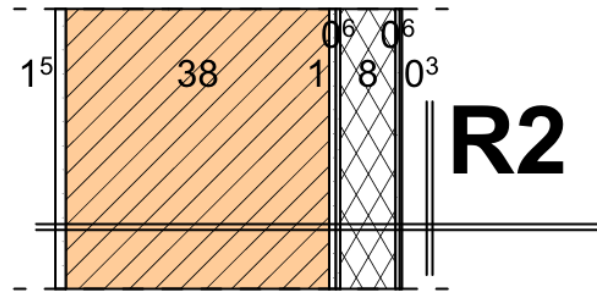
- 1,5 cm külső oldali mészvakolat
- 38 cm tömör, kisméretű téglafalazat
- 1 cm belső oldali mészvakolat



Az alapszerkezet kisméretű téglával falazott 38 cm vastag kétoldról mészvakolattal ellátott teherhordó homlokzati főfal. Azért ezt a falazat vastagságot választottuk, mert bár tárgyalt épületeinknél jellemzően jóval vastagabb falak is találhatóak az alsóbb szinteken, legfelül már előfordulhat 38 cm vastag falazat is. Úgy ítéltük meg, mivel a vékonyabb falazatnak lesz a legrosszabb az U értéke, így ezeknél a falaknál a legfontosabb a szigetelés lehetőségének kérdésköre.

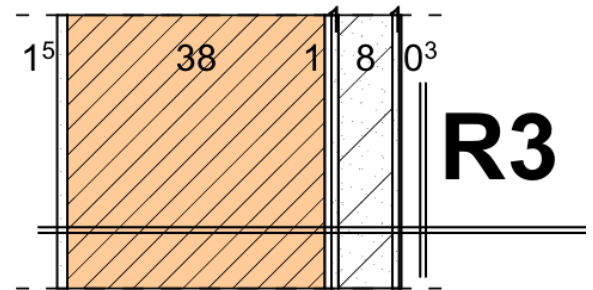
R2 - Kalcium-szilikát szigetelés

- 1,5 cm külső oldali mészvakolat
- 38 cm kisméretű téglafalazat
- 1 cm belső oldali mészvakolat
- 0,6 cm Multipor ragasztóhabarcs
- 8 cm Multipor hőszigetelő lap
- 0,6 cm Multipor ragasztóhabarcs, beágyazott üvegszövet hálóval
- 0,3 cm glettelés, festés



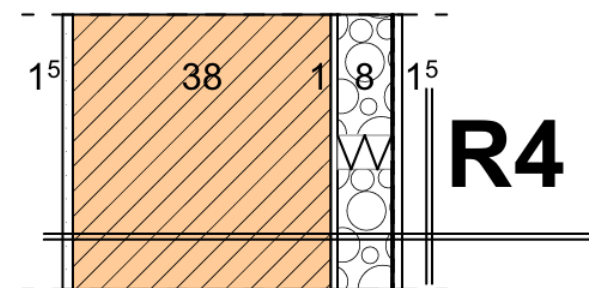
R3 - Farost szigetelés

- 1,5 cm külső oldali mészvakolat
- 38 cm kisméretű téglafalazat
- 1 cm belső oldali mészvakolat
- 1 cm agyag ragasztóhabarcs
- 8 cm Steico Internal farost hőszigetelés
- 1 cm agyagvakolat
- 0,3 cm glettelés, festés



R4 - Fűjt cellulóz szigetelés

- 1,5 cm külső oldali mészvakolat
- 38 cm kisméretű téglafalazat
- 1 cm belső oldali mészvakolat
- 8 cm Steico Floc fűjt cellulóz szigetelés 8x5 centiméteres XPS stafniváz közé fűjva
- Isover Vario Xtrasafe adaptív párazáró fólia
- 1,5 cm tűzvédelmi gipszkarton lap
- glettelés, festés



A fűjt cellulóz esetében több lehetőséget is megvizsgáltunk előzetes szimulációval: a tartószerkezetet XPS-sel és fával is szimuláltuk, illetve a párazárásra több opciót is vettünk. Ezek alapján legjobban a fenti rétegrend teljesített, így ezt mutatjuk be a dolgozatban.

1D szimulációk

A rétegrendek megtervezése után módot kellett találnunk a teljesítményük lemérésére. Megvalósult épületszerkezetek mérésére nem jutott mód, így számításokra és szimulációkra kellett hagyatkoznunk.

A vizsgálatra különböző pontosságú módszerek léteznek, például a Glaser módszer vagy a COND eljárás - bemutatásuk az II. mellékletben kapott helyet.

Bár ezek a módszerek is adnak valamiféle támpontot a szerkezetben történő hőáramlásról, mi szerettünk volna ennél pontosabb képet kapni a szerkezetekben fellépő hőmérséklet- és nedvesség mezőkről, így úgy döntöttünk, hogy szimulációs szoftverrel fogjuk megvizsgálni a belső hőszigetelő rendszereket.

Kritériumok

Mivel itthon még nincs a szimulációkra vonatkozó magyar szabvány, ezért a szimulációkat a DIN német szabvány alapján állítottuk össze.

A DIN 4108-3 (2018) a D.7.2-es fejezetben rögzíti a szimulációra vonatkozó ajánlásokat:

- Az időjárási ciklus ismétlődő legyen
- A víztartalom az egész szerkezetre legyen kiértékelve
- Változatlan (egyensúly) alatt azt értjük, amikor a víztartalom mennyisége a szerkezetben kevesebb, mint 1%-ot változik az előző évhez képest, az éves maximum értéket tekintve.
 - A víztartalom változása helyett a víztartalom növekedésével kell kiemelten foglalkoznunk, mivel a kiszáradt szerkezetek jellemzően nem eredményeznek problémát.
 - A száradó szerkezetek nem tekinthetők egyensúlyinak.
- Az egyensúlynak 10 éven belül elő kell állnia.
- Azokkal a rétegekkel, amelyek nagyon sok vizet fel tudnak venni (zöld tetők, időjárás védő falak) nem szabad számolni.
- A szabvány további kritériumait és részleteit a III. mellékletben részletezzük
- A szabvány ajánlásának megfelelően minden szimulációt egyaránt *10 éves időtávban* futtattunk.

DELPHIN

Az építőipari gyakorlatban azonban számos szimulációs program létezik a porózus építőanyagok, valamint réteges szerkezetek hő-, nedvesség- és anyagszállítási folyamatainak vizsgálatára, illetve a kapcsolódó 1, 2, és 3 dimenziós diagramok, modellek felállítására. (pl. WUFI, Fraunhofer IBP). Mi a TU Dresden (TUD) Bauklimatik Institut (Épületfizikai Intézet) által fejlesztett DELPHIN programot választottuk, mely Németországban széles körben elterjedt, megbízható szimulációs eszköz. A tervezési és mérnöki gyakorlat számos különböző területen alkalmazza:

- Hőhidak számítása, beleértve a higrotermikai szempontból problémás területek értékelését
- Belső hőszigetelő rendszerek tervezése és értékelése
- Szellőztetett homlokzati rendszerek, szellőztetett tetők értékelése
- Szárítási problémák (pincék, építési nedvesség, árvíz, ...)
- Penészesedés kockázatának számítása

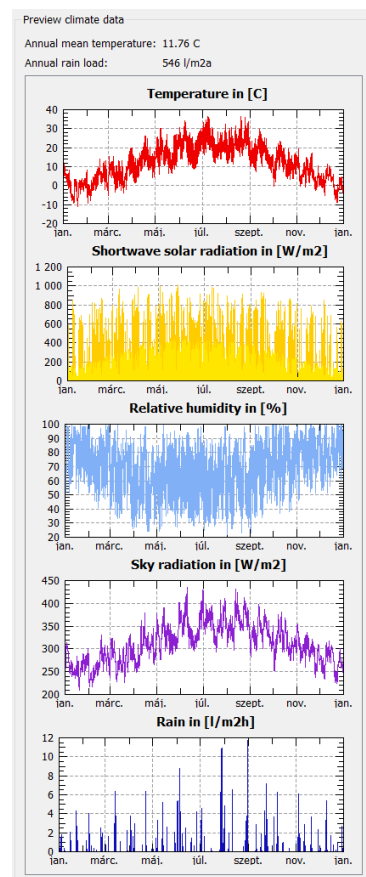
A következőkben részletesen tárgyaljuk a modellünk bemeneti paramétereit és feltételezéseit.

Időjárási adatok

A DELPHIN szimulációk alapját természetes éghajlati viszonyok, éghajlati tényezők adják:

- Hőmérséklet
- Relatív páratartalom,
- Napsugárzás
- Fény és hőszugárzás
- Csapadék
- Szélirány és sebesség

Az adatokat különböző adatbázisokból lehet megszerezni, jellemzően éves szinten órára lebontva. Mi a pestszentlőrinci meteorológiai bázisból származó TMY (typical meteorological year, tipikus meteorológiai év) adatait használtuk, ezt a Meteotest svájci meteorológiai intézet jóvoltából kaptuk meg.



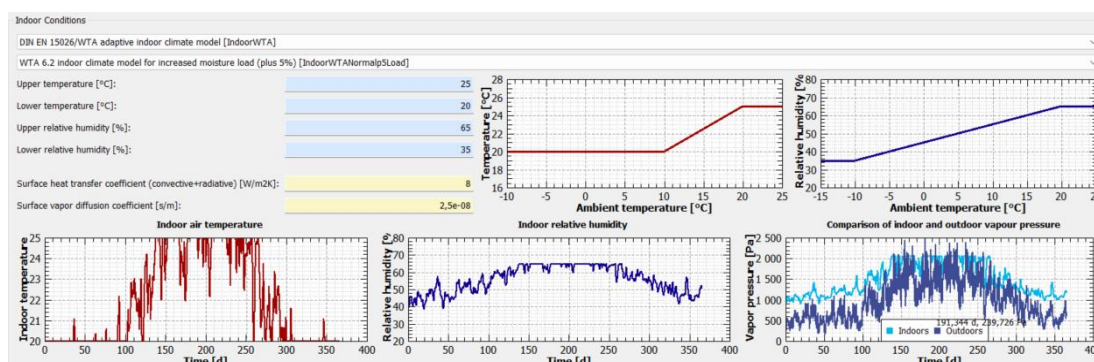
Fontos tényező emellett a szerkezet tájolása. Mivel a Magyarországon északnyugati irányú a mértékadó szélirány, és az épületek északi oldalát éri a legkevesebb nap, ezt az oldalt feltételezzük a legkitettebbnek általánosan a csapóesőnek, és az elfagyásnak. A vizsgálataink során ezért minden alkalommal *északi tájolást* fogunk feltételezni.

Belső klíma

A belső klíma modelljére több opció is adott, 4 tényezővel tudjuk beállítani:

- Hőmérséklet
- Relatív páratartalom
- Felületi hőátadási együttható
- Felületi páradiffúziós együttható

Az értékek lehetnek a felhasználó által beállított értékek, standardizáltak a DIN 4108-3 alapján, vagy adaptívak a WTA (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft) belső klíma modellje alapján. A WTA modell a belső klíma tulajdonságait a külső időjárás alapján állítja be, így a szimulációs adatok sokkal közelebb lesznek a valósághoz.



3.5_ábra. WTA adaptív belső klíma

A Delphin szimulációk futtatásához a következő anyagjellemzők szükségesek ([21] Fechner, H., 2024):

- Sűrűség
- Fajhő
- Hővezetési tényező
- Páradiffúziós ellenállás
- Víztartalom 80% relatív páratartalom felett
- Víztartalom effektív telítettséggel
- Vízfelvételi együttható

Építőanyagok

A szoftverben található egy anyag adatbázis, ami különböző építőanyagok laboratóriumban kimért és hitelesített adataival rendelkezik. A méréseket a drezdai egyetem vagy különböző gyártók végezték el. A vizsgálataink során ezt az adatbázist használtuk a szerkezetünk felépítésénél is.

R1 - Szigeteletlen falszerkezet

Name	λ	ρ	μ	Aw	w80	wsat
	W/mK	kg/m ³	-	kg/m ² s ⁰⁵	kg/m ³	kg/m ³
Lime Cement Plaster [145]	0,5500	1 270,0	12,0	0,00930	59,6	450,0
Old Building Brick Dresden ZB [533]	0,7886	1 769,2	8,6	0,15000	9,0	334,0

R2 - Kalcium-szilikát hőszigetelés

Name	λ	ρ	μ	Aw	w80	wsat
	W/mK	kg/m ³	-	kg/m ² s ⁰⁵	kg/m ³	kg/m ³
Lime Cement Plaster [145]	0,5500	1 270,0	12,0	0,00930	59,6	450,0
Old Building Brick Dresden ZB [533]	0,7886	1 769,2	8,6	0,15000	9,0	334,0
Climate plaster [125]	0,1685	844,1	8,8	0,17223	43,9	397,0
Multipor Minerally insulation board 2014 [643]	0,0441	98,5	3,0	0,00599	5,2	128,0
Calsitherm KP inside lime plaster [722]	0,6800	1 498,4	9,3	0,01894	34,2	430,0
Smoothing Trowel [680]	0,3140	1 349,6	8,3	0,05049	56,4	465,7

R3 - Farost hőszigetelés

Name	λ	ρ	μ	Aw	w80	wsat
	W/mK	kg/m ³	-	kg/m ² s ⁰⁵	kg/m ³	kg/m ³
Lime Cement Plaster [145]	0,5500	1 270,0	12,0	0,00930	59,6	450,0
Old Building Brick Dresden ZB [533]	0,7886	1 769,2	8,6	0,15000	9,0	334,0
Clay masonry mortar heavy [1786]	1,2600	1 828,4	16,5	0,08000	13,0	289,7
Wood Fibre Insulation Board [693]	0,0390	160,8	3,4	0,00289	17,9	550,0
Smoothing Trowel [680]	0,3140	1 349,6	8,3	0,05049	56,4	465,7

R4 - Fűjt cellulóz hőszigetelés

Name	λ	ρ	μ	Aw	w80	wsat
	W/mK	kg/m ³	-	kg/m ² s ⁰⁵	kg/m ³	kg/m ³
Lime Cement Plaster [145]	0,5500	1 270,0	12,0	0,00930	59,6	450,0
Old Building Brick Dresden ZB [533]	0,7886	1 769,2	8,6	0,15000	9,0	334,0
Blown-in Cellulose [580]	0,0482	55,2	2,0	0,56286	6,3	780,0
Polystyrene Board - Extruded [188]	0,0300	40,0	150,0	0,00001	1,1	950,0
Isover Vario XtraSafe [727]	0,2300	400,0	70 000,0	0,00010	6,5	20,0
Gypsum Board [81]	0,2000	850,0	10,0	0,27700	7,2	551,0

Modellezett fizikai folyamatok és tényezők

A Delphin program alapjául szolgáló elmélet termodinamikai elvekből származik, amelyek leírják a tárolási és szállítási folyamatokat, valamint a fázisok (folyékony és gáznemű) közötti átmeneteket. A modell képes számolni a porózus építőanyagok tulajdonságaival (vízfelvevő képesség, kapilláris tulajdonságok), és különbséget tesz a kondenzvíz különböző fázisai között.

A folyékony és gáz halmazállapotú víz egyensúly egyenleteit összegzi, nedvesség-tömeg egyensúlyt kap, amelyet a belső energia és a levegőtömeg egyensúlya tesz határoz meg. Ez egy parabolikus differenciál-egyenletrendszer eredményez, amelynek megoldásából állapotmezőként számítja ki a víztartalom, hőmérséklet és gáznyomás instabil változóit.

A Delphin a tárolási és szállítási folyamatoknál figyelembe veszi:

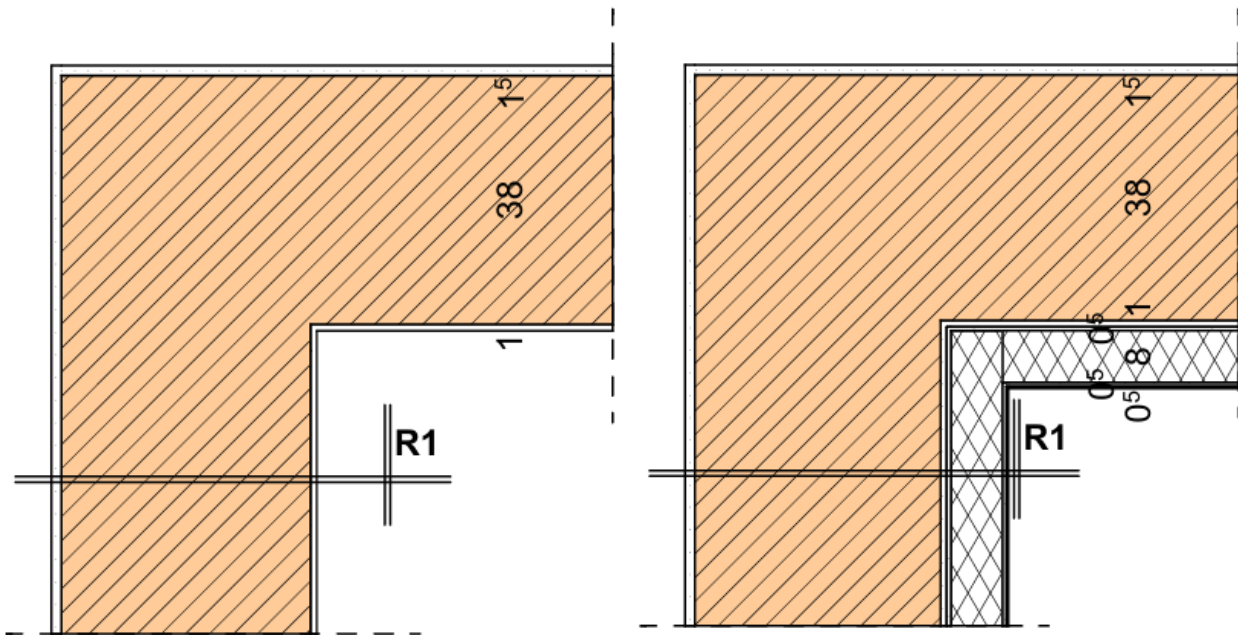
- Az anyagok porózus tulajdonságait
- A páratartalomtól és nedvességtől függő:
 - hővezetési tényezőt
 - páravezetési tényezőt
 - fajhőt
 - vízszállítást
 - diffúziós és kapilláris nyomás modellt
- A levegőfolyam, és légnyomásprofilok számítását a nyitott pórusokon keresztül
- A párolgást és kondenzációt
- A párolgásos hűlést

Bár a DELPHIN program nagyon pontosnak mondható, meg kell jegyezzük, hogy ez sem tükrözi száz százalékosan a valóságot, és itt is találhatók szükségszerű kisebb egyszerűsítések, tényezők, amelyeket a DELPHIN nem vesz figyelembe - ezeket a IV. számú mellékletben részletezzük.

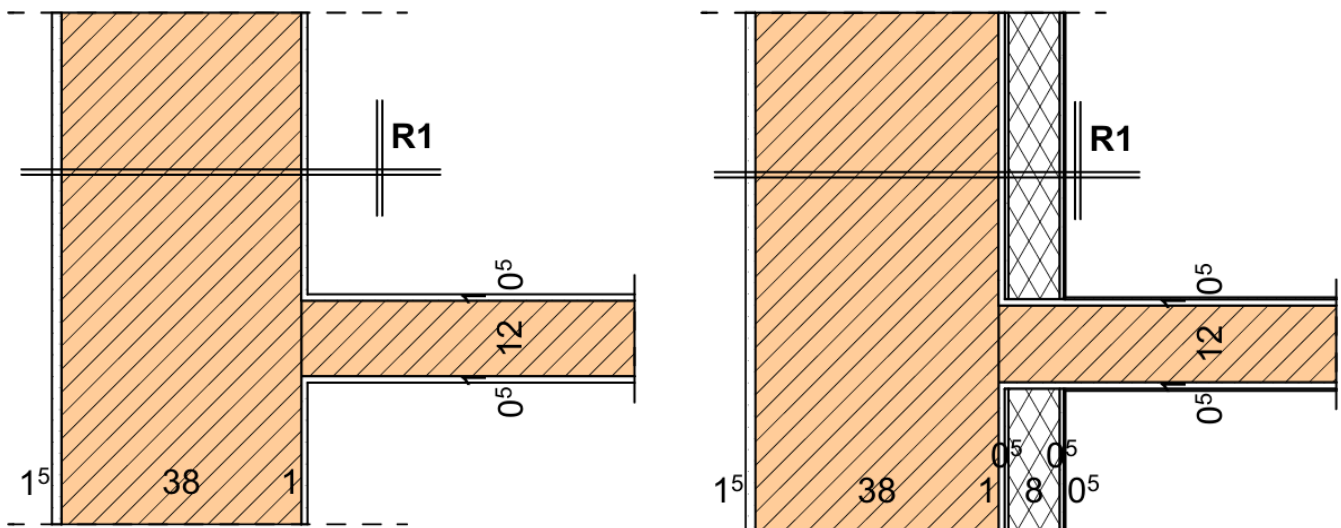
2D szimulációk

Az előzetes értékelések alapján a kalcium-szilikát teljesített legjobban. Ezt a rendszert ezután megvizsgáltuk három lényeges csomópontban is. A következőkben bemutatjuk ezeket a szerkezetcsatlakozásokat.

CSP1 - Külső falsarok

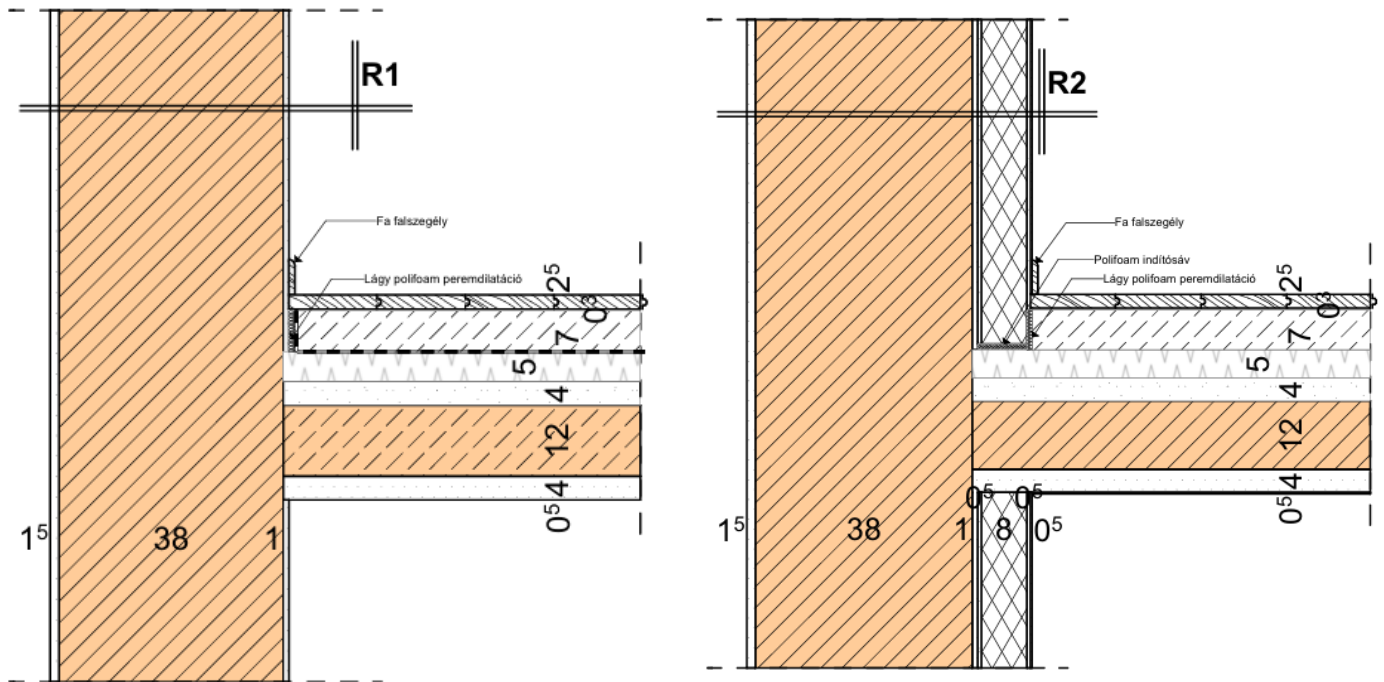


CSP2 - Lakáselválasztó fal és külső főfal csatlakozása



Feltűnő lehet a lakáselválasztó fal vékonysága: az általunk vizsgált historikus lakóépületek esetében a lakások közötti falakra még nem követelték meg a kiemelkedő hangszigetelési és hőtechnikai csillapítást, így azokat általában egy téglavastagságban falazták.

CSP3 - Födém és külső főfal csatlakozása felújított padló rétegreddel



A földem esetében a téglalozatot csúspontjában felvett metszetet vizsgáltuk, mivel a hőszigetelő tulajdonsággal is rendelkező feltöltés vastagsága itt a legcsekélyebb. Jelentős hőtechnikai kockázat adódhat ugyanakkor az acélgerendák csatlakozásainál is, erre azonban dolgozatunk nem tér ki.

A padlóretegrendet tekintve azzal a feltételezéssel élünk, hogy aki energetikailag korszerűsíti lakását, annak gondja lesz a padló rétegreddjének felújítására is.

A teljesség igényéből fakadóan itt jelezzük a lakásválasztó fal és a felújított padló rétegreddjét is:

R5 – Lakásválasztó fal

- 0,5 cm glettelés, festés
- 1 cm belső oldali mészvakolat
- 12 cm kisméretű tömör tégl
- 1 cm belső oldali mészvakolat
- 0,5 cm glettelés, festés

R6 – Felújított padló

- 2,5 cm keményfa parketta
- 0,3 cm ragasztó réteg
- 7 cm cementesztrich
- 5 cm EPS műanyag hab úsztató réteg
- 4 cm feltöltés
- 12 cm téglaboltozat
- 4 cm belső oldali mészvakolat
- 0,5 cm glettelés, festés

Szimulációk eredményeinek értékelése

A szimulációk eredményeit a PostProc nevű, szintén a Drezdai Egyetem Épületfizikai Intézete által fejlesztett program segítségével értékeltük.

Rétegredek értékelése

A rétegredek értékelését öt szempont alapján végeztük el:

1. Szerkezet hőátbocsátási tényezője (U -érték, W/m^2K)

A hőátbocsátási tényezőt tekintjük az egyik leglényegesebb leíró jellemzőnek, így elsőként ezt értékeljük.

2. Téli és nyári hőmérséklet csúcsok ($^{\circ}C$), izotermák, felületi hőmérsékletek (keresztmetszet) ($^{\circ}C$)

Lényeges szempont a belső felületek hőmérséklete mind komfortérzet, mind kondenzáció szempontjából.

3. Rétegrend nedvességtartalma (kg)

A teljes rétegrend nedvességtartalmának alakulása egy jellemző évben, kilogrammban kifejezve.

4. Nedvességtartalom egyensúlyának beállta (év)

A rétegrend nedvességtartalma attól a ponttól kerül egyensúlyba, amikor az éves csúcsértékek között nincs 1%-ot meghaladó növekedés.

5. **Fagykár (-)** - a német DIN 4108-3 szabvány D7.5 fejezete alapján a fagykár beáll, ha:

- az adott anyag pórusainak nedvességgel telítettségi aránya meghaladja a 30%-ot (nem érvényes 95%-nál kisebb egyensúlyi páratartalom esetében).
- a hőmérséklet alacsonyabb -5°C -nál

A vizsgálat általában a külső oldali rétegekre, valamint az azt tartó szerkezetekre terjed ki (például vakolat-tégla). Az adott réteg legfelső 10mm-ét kell megvizsgálni.

Csomópontok értékelése

A csomópontok értékelését pedig négy szempont alapján végeztük el:

1. **Nedvességtartalom egyensúlyának beállta (év)** - Azonos a rétegrendek értékelési szempontjaival
2. **Fagykár helye (-)** - Azonos a rétegrendek értékelési szempontjaival
3. **Hőmérsékleti izotermák alakulása egy jellemző téli napon** – A hőhídkockázatok érzékeléséhez, egy a téli időszakra jellemző hőmérsékleti térképet vizsgálunk.
4. **Hőmérséklet alakulása belső falsarokban, egy jellemző évben**
5. **Penészesedés** (Isopleth és VTT modellek használatával)

Az *Isopleth modell* a mért értékeket egy diagramon helyezi el a relatív páratartalom és a hőmérséklet függvényében. A diagramhoz tartozik egy kísérleti alapon kimért referenciavonal is. Ha az értékek a vonal fölé kerülnek, penészesedés kockázata lép fel.

A *VTT modell* az Isopleth függvény eredményeihez hozzárendel egy 0-6-ig terjedő penészesedési indexet az idő függvényében. A skála egyes fokozatai a következő értékekkel bírnak:

- 0 - nincs penész növekedés
- 1 - mikroszkóposan látható, kezdetleges növekedés
- 2 - mikroszkóposan látható növekedés, hifa kolóniák formálódása
- 3 - makroszkóposan látható növekedés kevesebb mint 10%-os lefedéssel, spórázás kezdete
- 4 - makroszkóposan látható növekedés kevesebb mint 50%-os lefedéssel
- 5 - látható micélium több mint 50%-os lefedéssel
- 6 - közel 100%-os lefedés

Az értékek alapján három különböző kockázati szint állapítható meg:

- 0 - 1: nincs kockázat
- 1 - 2: közepes kockázat (sárga jelölés)
- 2 - 6: magas szintű kockázat (piros jelölés)

Vizsgálataink kiértékelése során a VTT modellt használtuk, mivel ez szemléletesebb eredményekkel szolgált, mint az Isopleth-modell.

A belső mellett a külső oldali penészesedési kockázatra is kitértünk. Ez ugyan nem jelent közvetlen egészségügyi veszélyt a szennyezett falfelület mögött élők számára, azonban jelentős mértékben rontja az épület külső megjelenését, ami az általunk vizsgált historizáló bérházak szempontjából kifejezetten fontos aspektus, de erre a problémára megoldást jelenthetnek a modern penésztörő szerek, és különböző felületkezelések. Ezek vizsgálatára dolgozatunk nem tér ki.

Energiamérleg számítás

A tönkremeneteli módok és általános tanulságok elemzése után meg akartuk nézni, hogy milyen hatással van a belső oldali szigetelés az éves energiamérlegünkre. Ehhez kiválasztottunk egy konkrét budapesti épületet, azon belül pedig egy konkrét lakást. Az időbeni korlátok miatt egy lakás éves energiamérlegének számítását futtattuk csak le.

A vizsgált épület

- pontos címe: 1136 Budapest, Hegedűs Gyula utca 21.
- építésének éve: 1896

Az V. melléklet tartalmazza az épületfelmérés részletes adatait.

Therakles

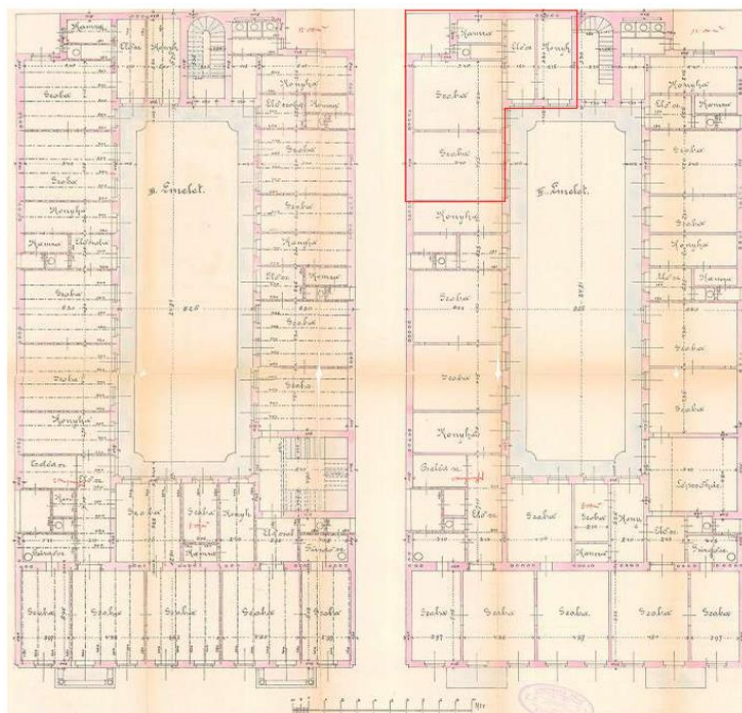
Az éves energiamérleg számítására a Therakles nevű programot használtuk, mivel ez is a TUD által fejlesztett program, így ugyanazzal az építőanyag adatbázissal dolgozik (megjegyzés: az adatbázisban szereplő anyagok elsősorban a német piacon elérhető anyagok adatai, így a Magyarországon elérhető építőanyagok adataitól bizonyos mértékben eltérhetnek).

A program részletes számítási mechanizmusa Andreas Nicolai - Physikalische Grundlagen des thermischen Raummodells THERAKLES című dolgozatában [21] olvasható, azonban általánosságban elmondható, hogy kielégítő pontossággal közelíti a hazánkban elterjedt számítási módszereket.

A program nem grafikus, így a határolófelületeket a következőképpen lehet beállítani:

Geometry and Climate		Project Information		Heating		Cooling		Mechanical Ventilation		Infiltration		Internal gains (equipment)		Internal gains (occupancy)		Shading Cont	
Room Dimensions and Thermal Storage Properties																	
Internal net area [m²]:		67,56															
Internal net height [m]:		3,85															
Volume [m³]:		260,106															
Location and Climate																	
[TMY Budapest pestszentlőrinc esővel 546lm2a.c6b] Budapest-lorinc, -																	
City/Country: Budapest-lorinc/- , Source: MN8																	
Longitude: 19,18 Deg , Latitude: 47,43 Deg																	
METEONORM Version 8.2.0.24079																	
Albedo [0..1]:		0,2 ☐ Anisotropic diffuse radiation model ☒ User defined ☐ DIN 4108-2															
Id	Construction	Construction type	Area [m2]	Orientation [deg]	Inclination [deg]	Window typ:											
0	Historical_brickwall CELL, 38 + 8 cm	Outside constru...	34,46	205 - South-West	90 - Vertical	Kapcsolt gerébtokos ablak											
1	Poroszsüveg_flooring	Inside constructi...	67,56														
2	Poroszsüveg_flooring	Inside constructi...	67,56														
3	Historical_brickwall, 38 cm	Construction to ...	47,55														
4	Historical_brickwall 12 cm	Inside constructi...	20,79														
5	Historical_brickwall 12 cm	Inside constructi...	20,79														

Tehát megadható a határolószervezetek pontos rétegrendje, felületi mérete, orientációja, külső falazat esetén nyílászáró szerkezetei. A nem külső falazatok esetén specifikálható, hogy belső falszerkezetről, vagy temperált zónával érintkező falszerkezetről van szó. Modellünkben a lakás tűzfalal (és azon túl egy másik, szintén historizáló épülettel) érintkező oldalát temperált zónával érintkező szerkezetként definiáltuk.



A fűtési és filtrációs ciklusokat az EN ISO 7730 és ISO 15251 szabványok alapján a következőre vettük fel:

Téli fűtéciklusok

Óra	Hőmérséklet (°C)
7-10	23
10-17	21
17-23	22
23-7	19

Hűtést nem feltételeztünk a lakásban.

A filtráció tekintetében 0,5/órás légcserét feltételeztünk.

A szimuláció eredményei alapján össze tudtuk hasonlítani a szigetetlen és a felújított lakás éves energiamérlegét és fűtési igényét. Ehhez a következő lépéseket tettük meg:

- Éves fűtési igény meghatározása Therakles szimuláció alapján
- Meghatároztuk a fűtési rendszer hatásfokát, és ez alapján a szükséges fűtési energiát:

$$\text{Szükséges fűtési energia (kWh)} = \frac{\text{Éves fűtési energiaigény (kWh)}}{\text{Kazán hatásfok}}$$

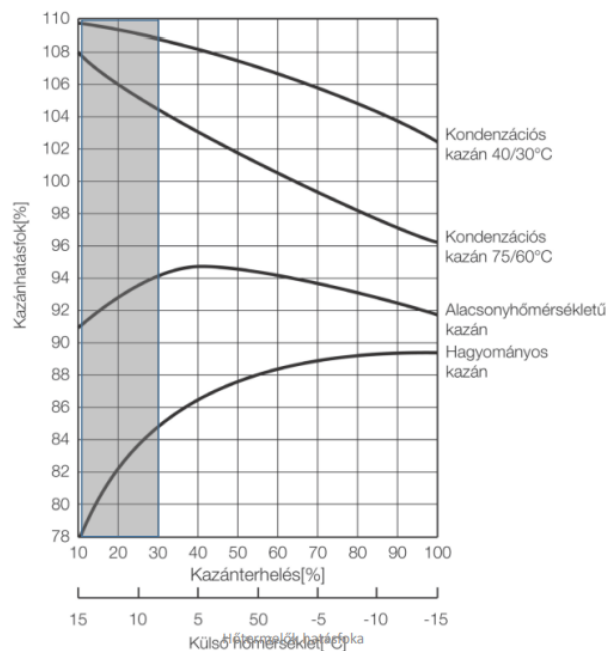
- A gáz fűtőértéke alapján kiszámoltuk a fűtési energiaigény kielégítéséhez szükséges gázköbmétert:

$$\text{Gázfogyasztás (m}^3\text{)} = \frac{\text{szükséges fűtési energia (kWh)}}{\text{gáz fűtőértéke (kWh/m}^3\text{)}}$$

A fűtési igényt a 2024 októberben érvényes lakossági gázárak alapján 102 Ft/m³-ben határoztuk meg ([23] Weinhardt Attila, Portfolio, 2024).

Perényi et al. (2016) szerint a gázkazánal fűtött historizáló bérházak túlnyomórészt állandó hőmérsékletű rendszerben működnek (a teljes épületállomány mintegy 24%-a ilyen), ezért modellünkben ezt a típust feltételeztük. A gázkazán hatásfokát az alábbi táblázat alapján határoztuk meg: ([24] Dr. Csoknyai és Dr. Horváth, 2022)

Kazántípusok hatásfok változása a kazánterhelés függvényében



2022. 04. 22.

13

A táblázat alapján a hatásfok 89,5%.

A gáz fűtőértékét pedig a MET cikke alapján határoztuk meg 9,4 kWh/m³-ban ([25] MET, 2024).

Kivitelezési költségek

A pénzügyi nyereségek kiszámításához az energiamérleg mellett szükségünk volt a kivitelezés teljes költségének modellezésére is.

Az elemzést az R2 - kalcium-szilikát rétegrendhez készítettük el, és az alábbi folyamatot állítottuk össze a gyártó alkalmazástechnikája alapján:

- 1. fogadó felület tisztítása
- 2. fogadó felület kiegyenlítése
- 3. elválasztó filc elhelyezése a falszegélybe
- 4. hőszigetelőtáblák rögzítése rendszersaját ragasztóhabarccsal
- 5. felületkiegyenlítés becsiszolással
- 6. üvegszövetháló elhelyezése
- 7. belső oldali vakolás mész-cement vakolattal
- 8. glettelés
- 9. festés

Majd ezt az 2024-es Építőipari Költségbecslési Segédlet alapján a következő folyamatokkal azonosítottuk ([26] Karácsony, 2024):

Kivitelezési folyamatok - Multipor				
Sorszám	Munkafolyamat leírása	Tételszám	Megnevezés	Ft/m2
1.	fogadófelület tisztítása			
2.	fogadófelület felületkiegyenlítése			
3.	elválasztó filc elhelyezése a falszegélybe			
4.	hőszigetelőtáblák rögzítése rendszersaját ragasztóhabarccsal	5.2.4.1	Polisztirol lapos hőszigetelő rendszerek	9220
5.	felületkiegyenlítés becsiszolással			
6.	üvegszövet háló erősítés elhelyezése			
7.	belső oldali vakolás	5.1.1.1	Mészhabarcs vakolat 1,5 cm vtg	3000
8.	glettelés	13.1.1.1	Gipszes simítás és élvédők elhelyezése (pl.: RIGIPS)	1530
9.	festés	13.1.2.1	Mészfestés, hagyományos mézsfestéssel 2-3 rtg.ben	1040
Összesen:				14 790 Ft/m2

Ez alapján megállapítottuk, hogy a Multipor belső hőszigetelő rendszer teljes kivitelezési költsége (anyag + munkadíj):

Anyagköltség	~16 830 Ft/m2
--------------	---------------

Munkadíj	~14 790 Ft/m ²
Összesen:	~31 620 Ft/m ²

Eredmények összegzése, értékelés

Végül a dolgot értékeljük részben a tönkremeneteli módok alapján, részben pedig az energiamérleg alapján csökkenő fűtési költség és a kivitelezési költségek alapján.

4. Eredmények és értékelés

1D szerkezetek

1. Hőátbocsátási tényező

A rétegrendek hőátbocsátási tényezőit a jelen pillanatban érvényben lévő, 9/2023. (V. 25.) ÉKM “Az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról” című rendelet [27] által meghatározott homlokzati falszerkezetekre vonatkozó hőátbocsátási tényezővel tudunk összevetni. A tényezők számítása során egy +5%-os korrekciós tagot iktattunk be, az MSZ EN ISO 10456 szabványnak megfelelően. Erre azért volt szükség mivel a hővezetési tényezők valós értéke, a hőmérséklet, a nedvesség és az öregedés függvényében változhat a gyártó által megadott értéktől, és ezzel a biztonság javára tévedünk a méretezés során. Továbbá a felületi hőátadási együtthatókat $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ és $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ -nek vettük.

Vizsgált falszerkezet	Hőátbocsátási tényező (U) értéke, W/m ² K
R1 - Szigeteletlen	1,49
R2 - Kalcium-szilikát hőszigeteléssel	0,41
R3 - Farost lemez hőszigeteléssel	0,36
R4 - Fújó cellulóz hőszigeteléssel	0,43
9/2023. (V. 25.) ÉKM rendelet által meghatározott érték	0,24

Mint az a vizsgálati adatokból is kitűnik, a követelmény által meghatározott értéket ugyan nem tudtuk elérni, azonban így is szignifikáns a javulás mértéke a szigetetlen falszerkezethez képest.

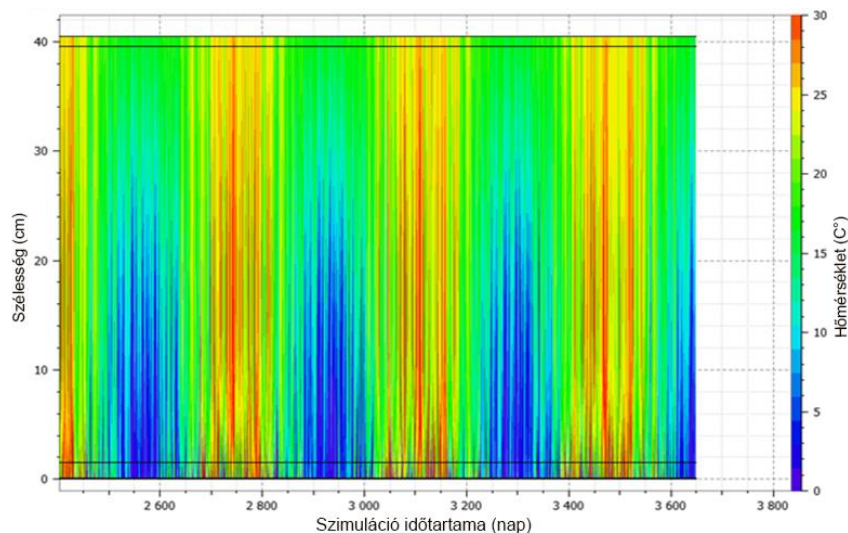
2. Téli és nyári hőmérséklet csúcsok, izotermák

A belső felületi hőmérséklet vizsgálatánál a következő eredményeket kaptuk:

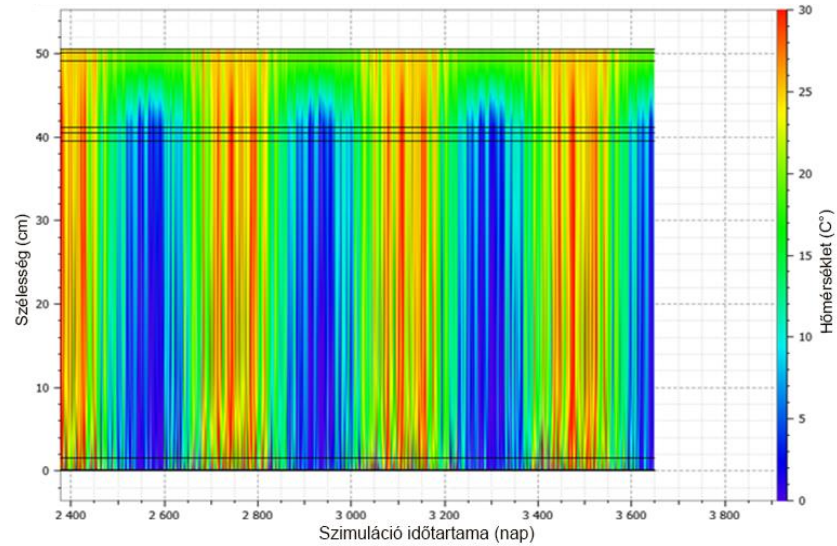
Vizsgált falszerkezet	Legmagasabb belső felületi hőmérséklet (nyári időszak), C°	Legalacsonyabb belső felületi hőmérséklet (téli időszak), C°
R1 - szigetetlen	27	14,8
R2 - kalcium-szilikát	25,4	18,8
R3 - farost	25,5	18,6
R4 - fűjt cellulóz	25,2	18,8

Az eredmények megmutatják, hogy a téli időszakban a szigetelt szerkezet segítségével jóval kellemesebb komfortérzet biztosítható a magasabb hőmérsékletű felületek nyomán; a teljes keresztmetszetet vizsgálva ugyanakkor szignifikáns különbség adódik a szigetetlen szerkezethez képest: belső hőszigetelés esetében a falszerkezet egészen a szigetelésig áthűl, gyakran fagypontra is.

A nyári időszakra - az enyhén eltérő felületi hőmérsékletektől eltekintve - mindkét szerkezetre nagyon hasonló eredményeket kaptunk.



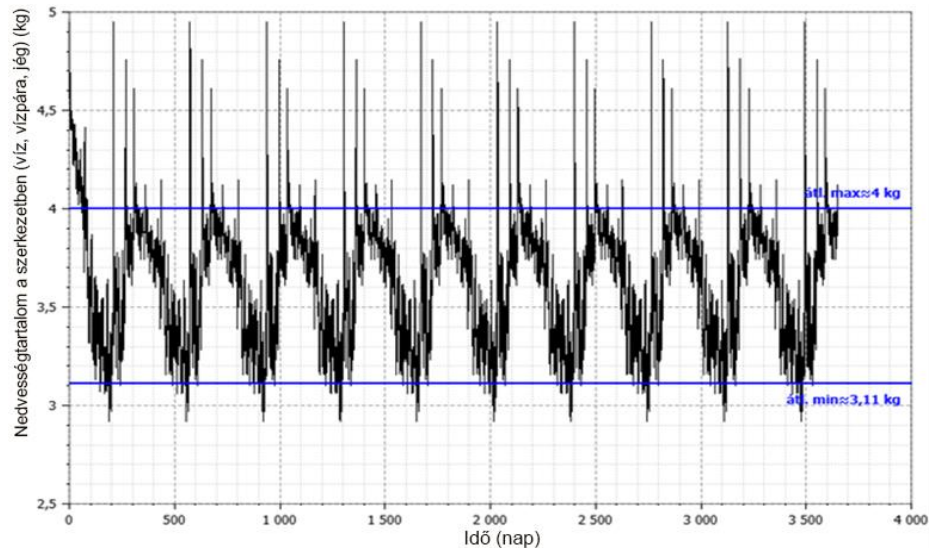
4.1_ábra. Hőmérsékleti térkép a szimuláció utolsó három évében, R1 - szigetetlen falszerkezet



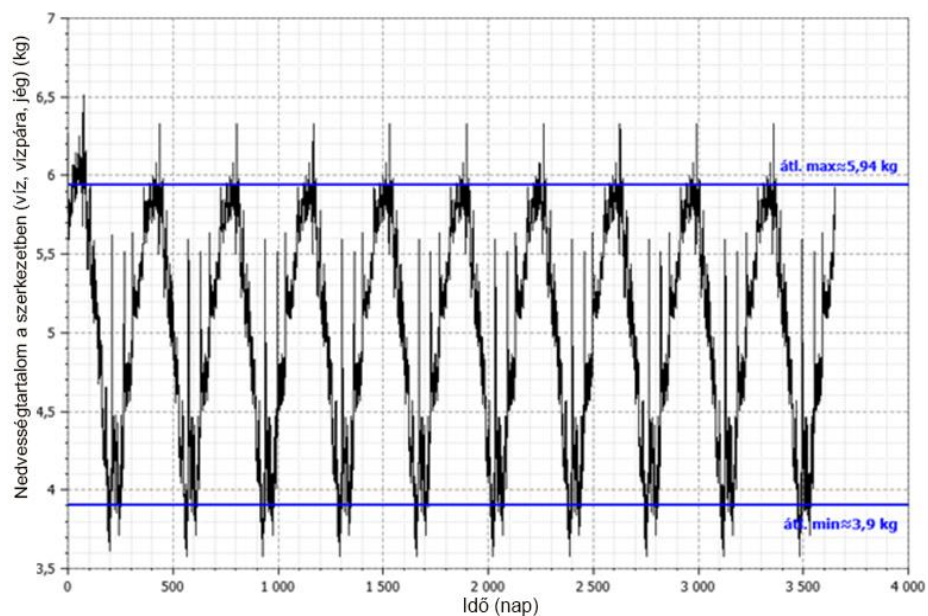
4.2_ábra. Hőmérsékleti térkép a szimuláció utolsó három évében,
R2 - kalcium-szilikát

3. Rétegrend nedvességtartalma

Az 1D-s szerkezetek vizsgálatai érdekes eredményeket hoztak: a szakirodalomban leírtakhoz hasonlóan a nedvességtartalom a szigetelt falazat belsejében, valamint a külső és belső alapvakolatban növekedett meg, azonban csupán néhány tized tömegszázaléknyit. Az éves átlagot tekintve a teljes falszerkezetek 1x1 méteres keresztmetszetére a következőképpen alakult a nedvességtartalom:

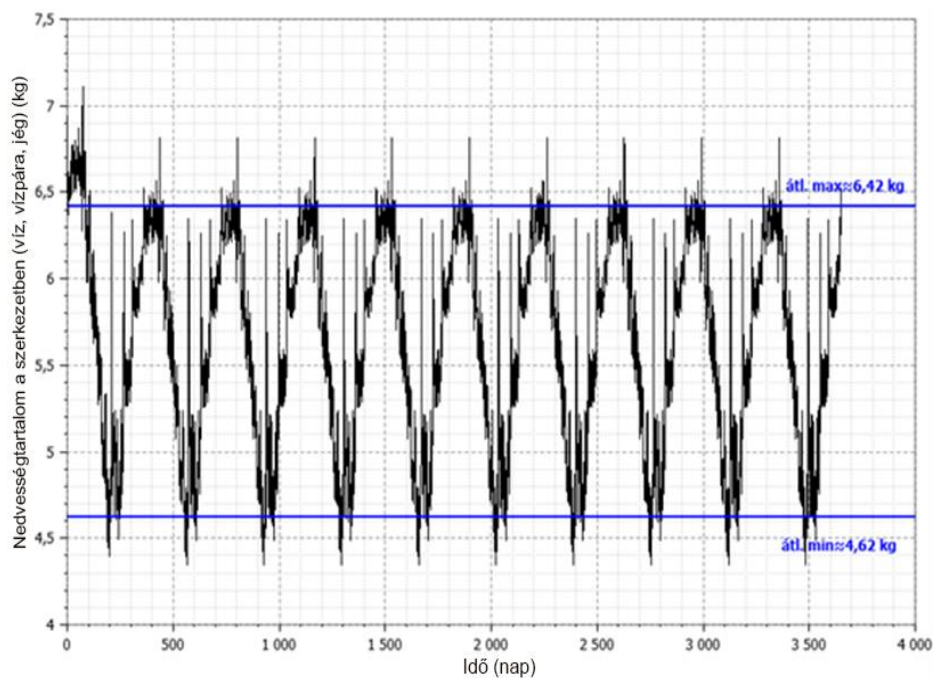


4.3_ábra. Nedvességtartalom napi átlagos értékei a szerkezet 1x1 méteres metszetére,
R1 - szigetetlen falszerkezet

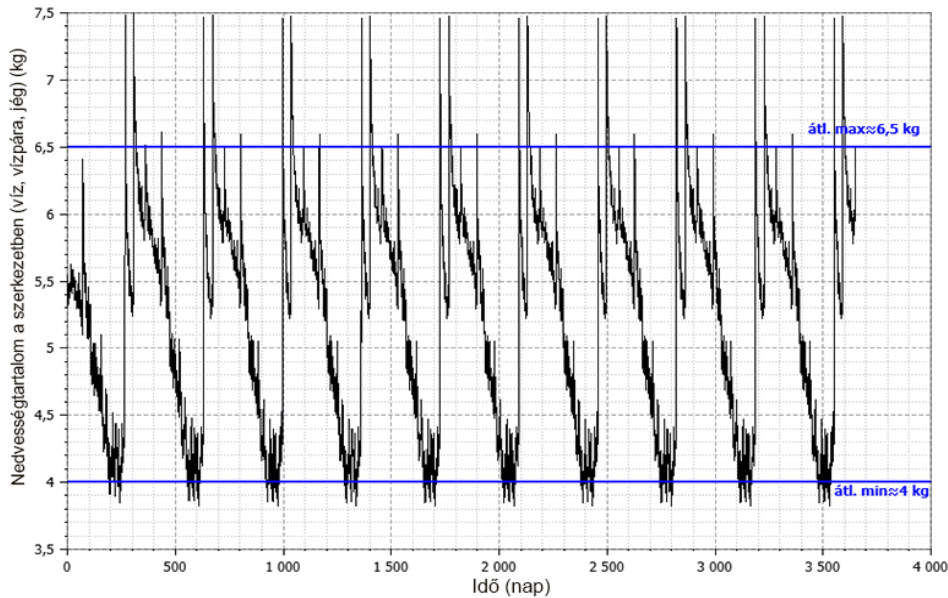


4.4_ábra. Nedvességtartalom napi átlagos értékei a szerkezet 1x1 méteres metszetére,
R2 – kalcium-szilikáttal szigetelt falszerkezet

S



4.5_ábra. Nedvességtartalom napi átlagos értékei a szerkezet 1x1 méteres metszetére,
R3 – farosttal szigetelt falszerkezet



4.6_ ábra. Nedvességtartalom napi átlagos értékei a szerkezet 1x1 méteres metszetére,
R4 – fűjt cellulózzal szigetelt falszerkezet

Megfigyelhető, hogy a legnagyobb érték a fűjt cellulóz hőszigetelés esetében áll fenn, ez hozzávetőlegesen 2,5 kg nedvesség többletet jelentett. Ez az 1x1m-es falazat ($\rho=1769,2 \text{ kg/m}^3$) felületének tömegével ($0,38\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m} = 0,38 \text{ m}^3$, 672,3 kg) összevetve ($2,5/672,3 \approx 0,4 \text{ m}\%$) csupán elenyésző növekményt jelent. Az adatok ugyan alátámasztják, hogy a belső oldali szigetelés rontja a falazat kiszáradó képességét, azonban a rétegekben fennálló többlet nedvesség mennyisége rendkívül csekély a mi esetünkben.

4. Nedvességtartalom egyensúlyának beállta

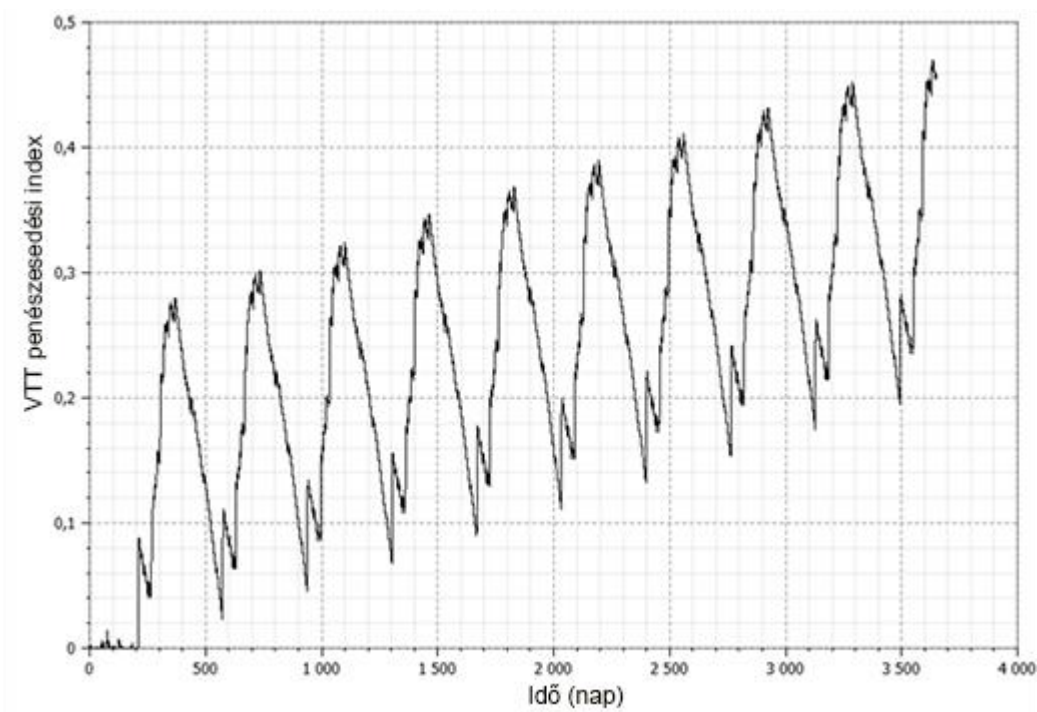
A nedvességtartalom éves ingadozását tekintve minden rétegrendnél az első év után beállt az egyensúly, mindemellett az éves átlagos nedvességtartalom csúcserkékei sehol sem mutattak növekményt.

5. Fagykár

A szigeteletlen, valamint a három különböző szigetelt falszerkezetben a DIN 4108-3 alapján egyaránt nem lépett fel fagykár.

6. Penészesedés

A belső és külső oldalt vizsgálva az R1, R2, R4 rétegrendek megfelelték ($VTT < 0,1$), egyedül a farost szigetelés esetében adódtak érdekes adatok:



4.7_ábra. VTT-modell penészesedési grafikon a szimuláció teljes időtartamára,
R3 - farosttal hőszigetelt falszerkezet

A grafikonról leolvasható, hogy a kockázat (amely a hidegebb időszakokban éri el csúcspontját), a tizedik év végére sem haladja meg az első kockázati szintet ($VTT_{max}=0,47$), azonban a növekedési tendenciát vizsgálva nem kizárható, hogy hosszútávon problémák léphetnek fel a homlokzaton.

Összefoglaló táblázat

Rétegrend	Hőátbocsátási tényező (U) értéke, W/m^2K	Fagykár	Nedvességfelvétel maximuma (kg):	Nedvességtartalom egyensúlyának beállta	nyári / téli, C°	Penészesedés kockázata, VTT_{max}
R1 - Szigeteletlen	1,49	nincs	4,95	1. év	27 / 14,8	<0,2
R2 - Kalcium-szilikát hőszigeteléssel	0,41	nincs	6,33	1. év	25,4 / 18,8	<0,2
R3 - Farost hőszigeteléssel	0,36	nincs	6,82	1. év	25,5 / 18,6	<0,47
R3 - Fújó cellulóz hőszigeteléssel	0,43	nincs	7,48	1. év	25,2 / 18,8	<0,2

A szimulációk eredményei alapján úgy láttuk, hogy a kalcium-szilikát szerepelt a legjobban, ezért ezzel az anyaggal építettük fel és futtattuk a komplex 2D-s szimulációkat.

Csomópontok értékelése

Általános eredmények

A szimulációk kiértékelésénél több szempont esetében is megegyező viselkedés mutatkozott az egyes szerkezetek között, ezek ismertetésével indítjuk a csomópontok értékelését.

1. Nedvességtartalom a szerkezetekben, egyensúly beállta

A vizsgált csomópontoknál az 1D-s szimulációknál is fellépő tendencia mutatkozott: az anyagok nedvességtartalma belső szigetelés esetében elenyésző mértékben megnövekedett a falazatban, valamint a külső és belső alapvakolatban. A nedvességtartalom egyensúlya minden szerkezet esetében az első évre beáll, ezek után a szimuláció időtartamára változás már nem történik.

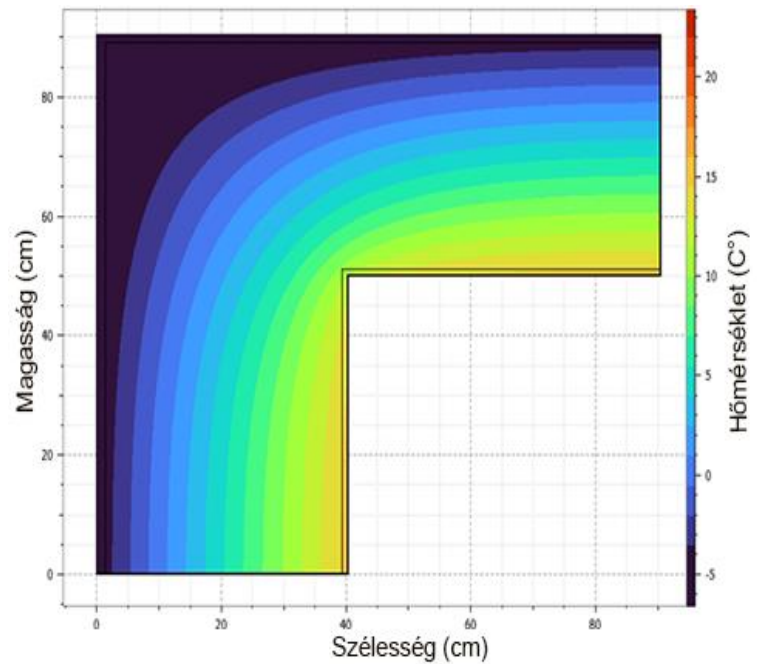
2. Fagykár

Fagykár tekintetében a szimuláció teljes időtartamára a DIN 4108-3 alapján a szerkezetek egyikében sem keletkezik károsodás.

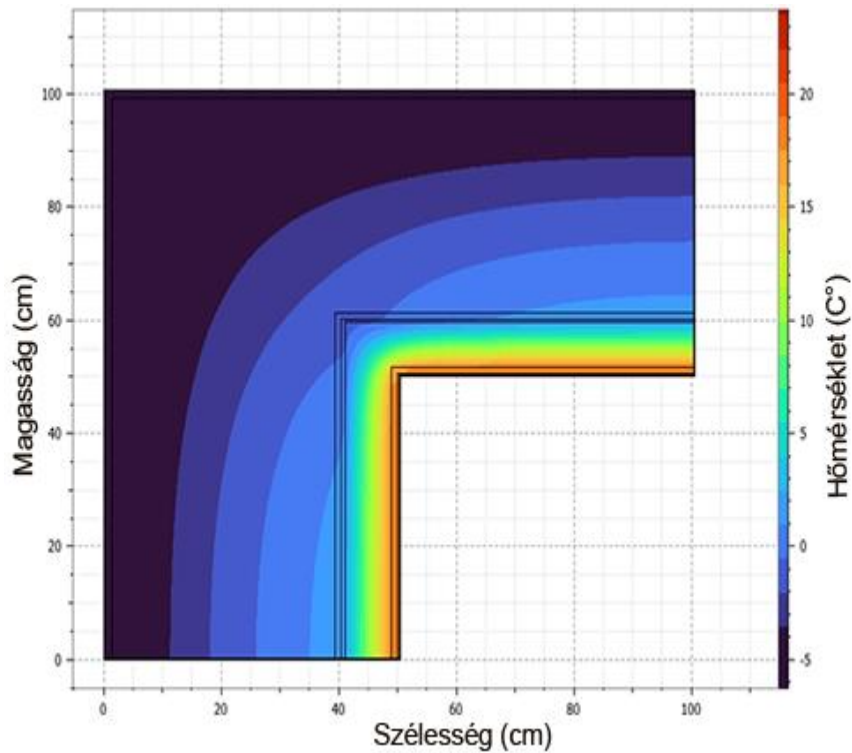
CSP1 - Külső, pozitív falsarok

A homlokzati falak külső sarkai különleges geometriájuk miatt fontos vizsgálni: a kisebb hőfelvevő, és nagyobb hőleadó felület okán ez a szerkezeti rész mind kívül, mind belül jobban át tud hűlni. Így a hőveszteség mellett a vizesedés (beleértve a fagykár), illetve a penészesedés szempontjából lesz érdekes. Külön érdekesség, hogy a csomópontnak egy északi, illetve egy nyugati oldala is van. A szimulációinknál minden egyéb esetben a legkitettebb helyzetet, azaz az északi tájolást vizsgáltuk, így ez az elrendezés lehetőséget nyitott az eltérő tájolások okozta különbségek összehasonlítására is.

3. Hőmérsékleti izotermák alakulása egy jellemző téli napon



4.8_ábra. Hőmérséklet-térkép alakulása egy jellemző téli nap esetében, szigetetlen külső sarok

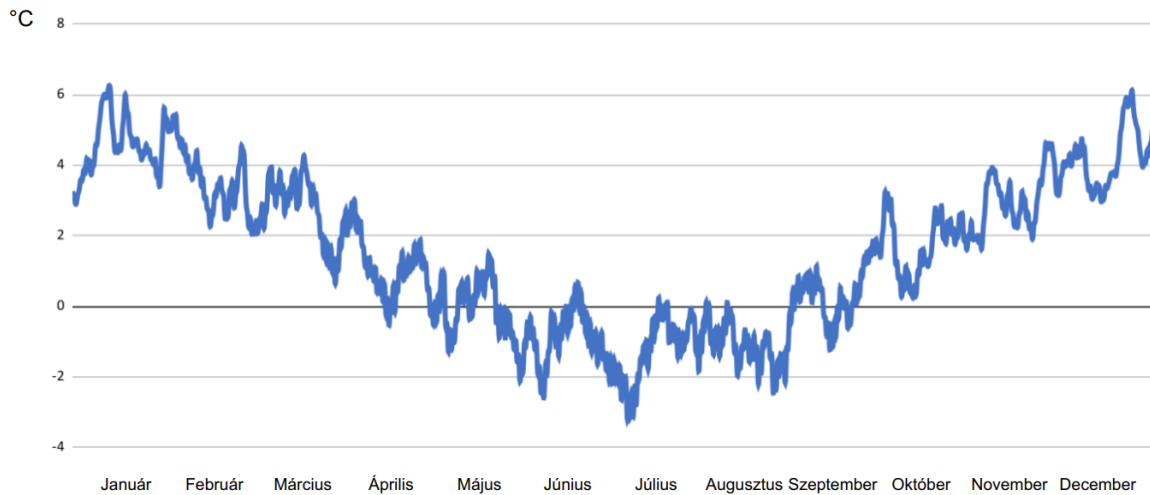


4.9_ábra. Hőmérséklet-térkép alakulása egy jellemző téli nap esetében, szigetelet külső sarok

A 4.8-as és 4.9-es ábráról leolvasható, hogy a szigetelt falsarok esetében jóval szélesebb tartományban hűlt le a falszerkezet, a hőtároló képesség tulajdonképpen eltűnt; leolvasható ugyanakkor az is, hogy a belső felületi hőmérséklet kedvezőbben alakul.

4. Hőmérséklet alakulása belső falsarokban, egy jellemző évben

A szigetelés után a sarokélben 6°C-os javulást sikerült elérni télen.

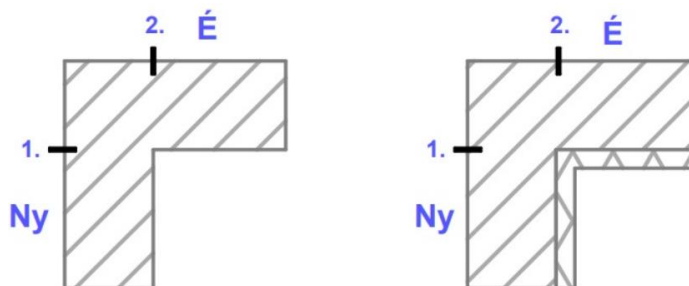


4.10_ábra. Felületi hőmérséklet változása a sarokélben szigetelés után egy jellemző évben

5. Penészesedés

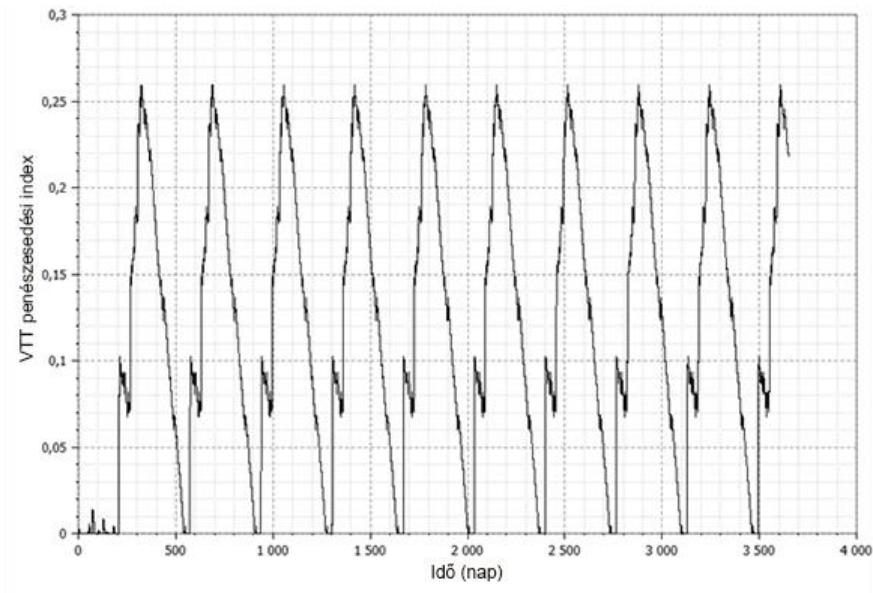
A belső oldal mentén egyedül a sarkokat vizsgáltuk, mivel ezen élek bizonyulnak a legkitettebbnek, ezektől távolodva fokozatosan növekszik a hőmérséklet. A vizsgálatok nyomán a belső sarokban nem jött létre penészképződés ($VTT_{max} < 0,2$).

A falszerkezet külső oldalán több mérési pontot is elhelyeztünk, tekintve, hogy a csomópontnak egy északi, illetve egy nyugati oldala is van. A mérési pontok helyét a 4.11-es ábra mutatja:

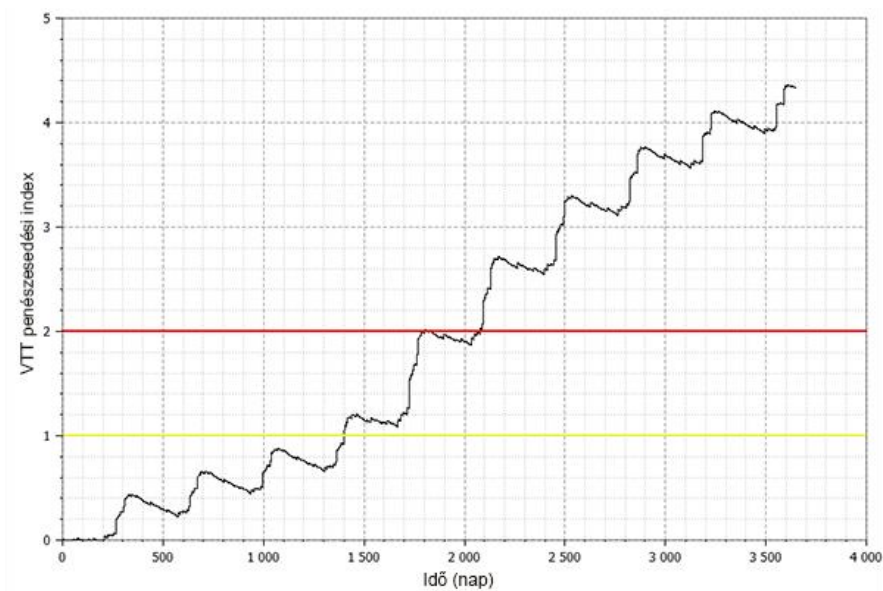


4.11_ábra. Mérési pontok

A falsarok külső éle szigetelt és szigetetlen szerkezetek esetében egyaránt bepenészedett: ez a belső tértől távol eső pozíciójának köszönhető. Az északi és a nyugati oldalakat összevetve jelentős különbség adódik: míg a nyugati oldal stabilan a kockázati szint alatt marad ($VTT_{max} < 0,26$), addig az északi már a negyedik év folyamán átlépi az első kockázati szintet, és a hatodik évben a másodikat is.

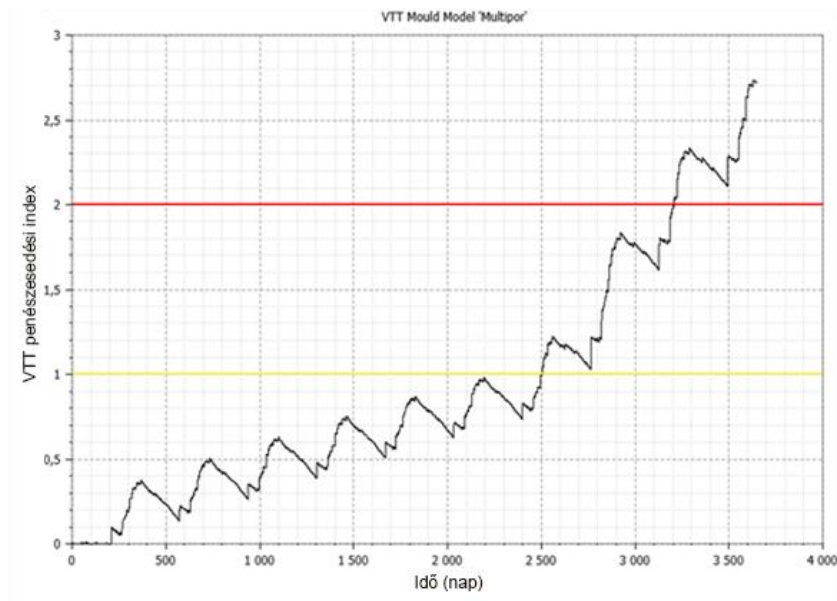


4.12_ábra. VTT penészesedési index szigetetlen falsaroknál,
1-es mérőpont (nyugati oldal)

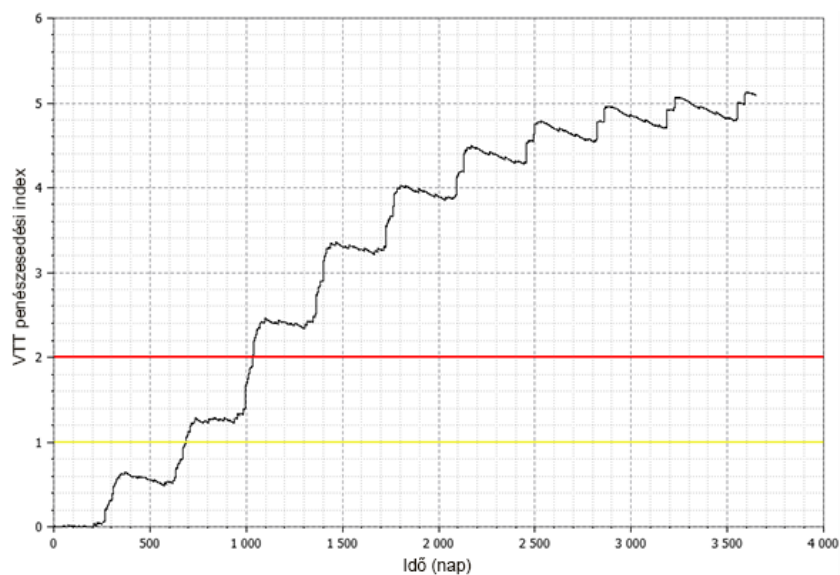


4.13_ábra. VTT penészesedési index szigetetlen falsaroknál,
2-es mérőpont (északi oldal)

Szigetelés esetében a szimuláció végére a nyugati oldal esetében is elérjük a magas kockázati szintet, az északi oldalon pedig még előbb érkezünk a kockázatos tartományhoz:



4.14_ábra. VTT penészesedési index szigetelt falsaroknál, 1-es mérőpont (nyugati oldal)



4.15_ábra. VTT penészesedési index szigetelt falsaroknál, 2-es mérőpont (északi oldal)

Megállapítható tehát, hogy a belső szigetelés okozta lecsökkent külső felületi hőmérséklet, illetve a nedvességtartalom többlet eltérő tájolások esetében is negatív kihatással van a homlokzati penészképződésre.

Összefoglaló táblázat

	Szigeteletlen csomópont	Szigetelt csomópont
Fagykár	Nincs	Nincs
Penészesedés a belső sarokban	Nincs	Nincs
Nedvesség beállta	1 év	1 év

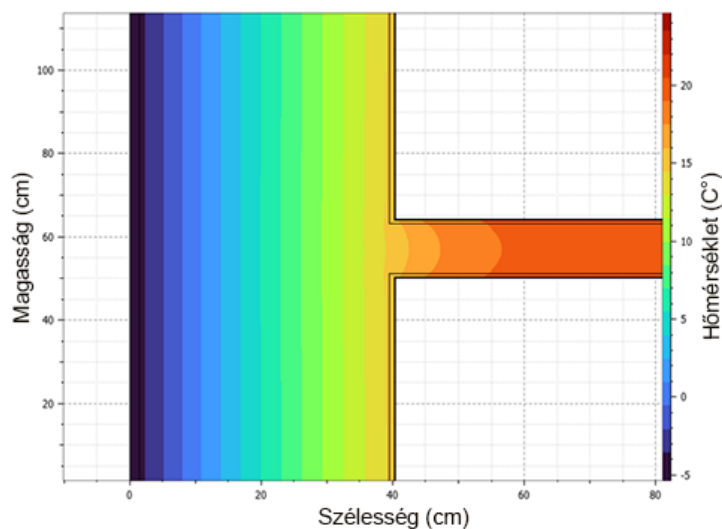
CSP2 - Lakásválasztó fal és külső főfal csatlakozása

Míg a hagyományos, külső oldali hőszigetelésnél a termikus burok általában az egész épületet körbeöleli - így lehatárolt egységet képezve a belső szerkezet thermo- és higrodinamikájában - belső oldali hőszigetelésnél erre általában nincs lehetőség. Különösen igaz ez a mi esetünkben, amikor egyénileg kivitelezett felújításról van szó.

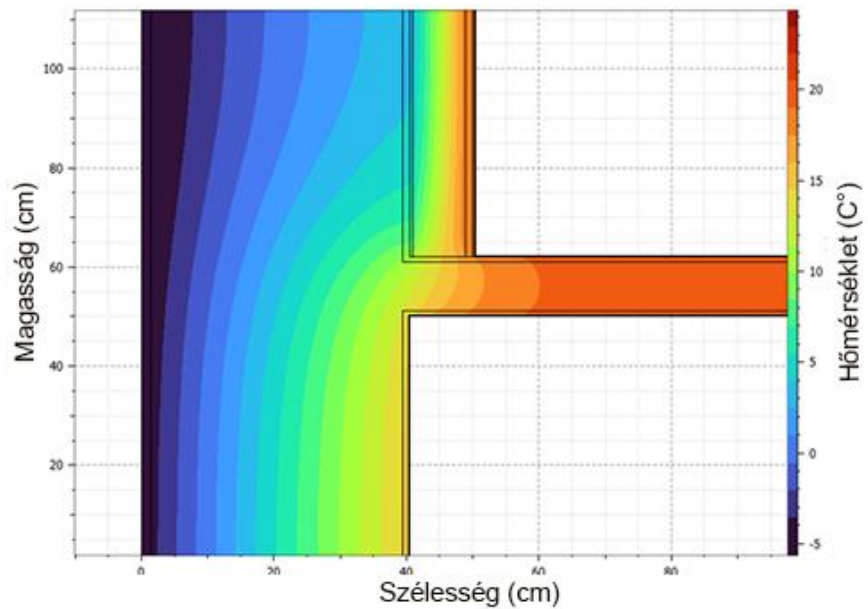
Ezért azt is megvizsgáljuk, hogy mi történik lakásválasztó fal két oldalán. Vizsgálatunk során 3 csomóponti kialakítást néztünk meg:

- Hőszigetelés nélküli falcsatlakozás (1.)
- Egy oldalról szigetelt csomópont (2.)
- Mindkét oldalról szigetelt csomópont (3.)

3. Hőmérsékleti izotermák alakulása egy jellemző téli napon

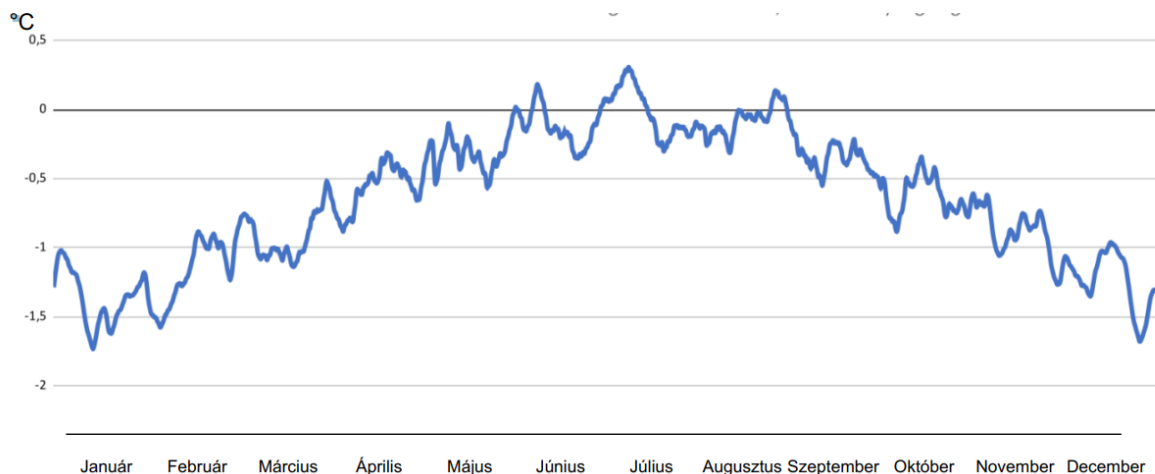


4.16_ábra. Hőmérséklet-térkép alakulása egy jellemző téli nap esetében, 1.-es falszerkezet



4.17_ábra. Hőmérséklet-térkép alakulása egy jellemző téli nap esetében, (2.)-es falszerkezet

Féloldali szigetelésnél a szerkezet asszimetriájából adódóan az izotermák elmozdultak, mely hatással volt a szigetetlen oldal hőmérséklet eloszlására is. Ez nyáron még jelentéktelen emelkedéssel, télen azonban már számottevő, több mint 1,5°C-os csökkenéssel járt. Mindezek ellenére a legalacsonyabb hőmérsékleti érték sem csökkent le a DIN 4108-2: 2003-07 által meghatározott 12,6 C°-os érték alá.



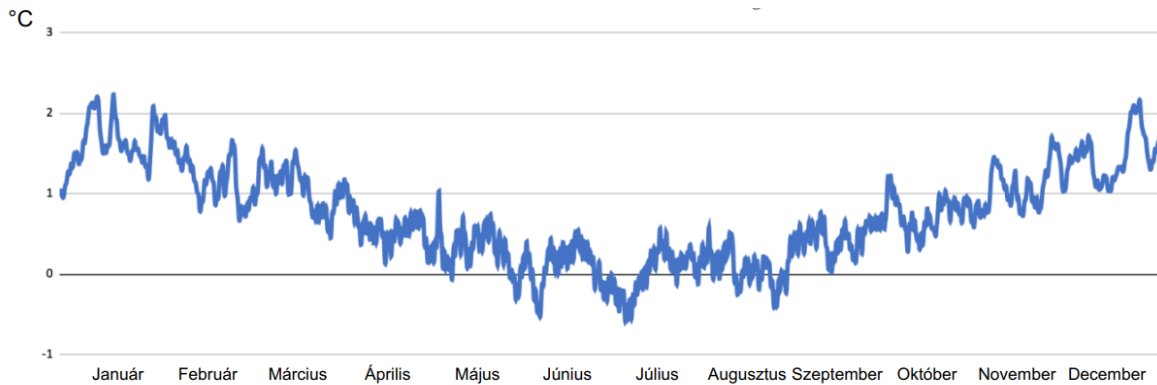
4.18_ábra. Szigetetlen lakás sarokéljének hőmérsékletének változása szomszéd oldali szigetelés előtt és után egy jellemző évben

Kétoldali hőszigetelés esetén a szigetelés felhelyezéséből adódóan a falcsatlakozásnál található hőhíd ugyan megnőtt, azonban az nem hatott ki szignifikánsan a belső hőmérsékletre, így itt is igen kedvezően alakultak a belső oldali hőmérsékletek.

4. Hőmérséklet alakulása belső falsarokban, egy jellemző évben

A vizsgálatunk során az hőszigetelés nélküli szerkezet (1.) egyik sarok élet hasonlítottuk össze az egyik oldalt szigetelt szerkezet (2.) szigeteletlen, illetve szigetelt sarkával.

Az értékek az 1D-és szerkezeteknél kapott eredményeket tükrözték: a szigetelt szerkezet esetében a belső oldal kevésbé melegedett fel a nyáron, míg télen kevésbé hűlt le.

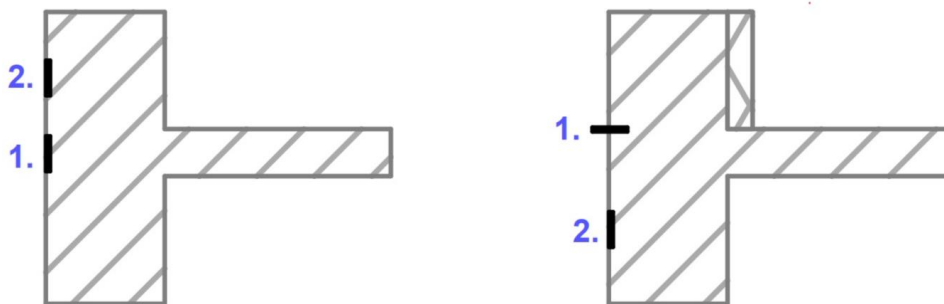


4.19_ábra. Sarokél hőmérsékletének változása szigetelés előtt és után egy jellemző évben

5. Penészesedés

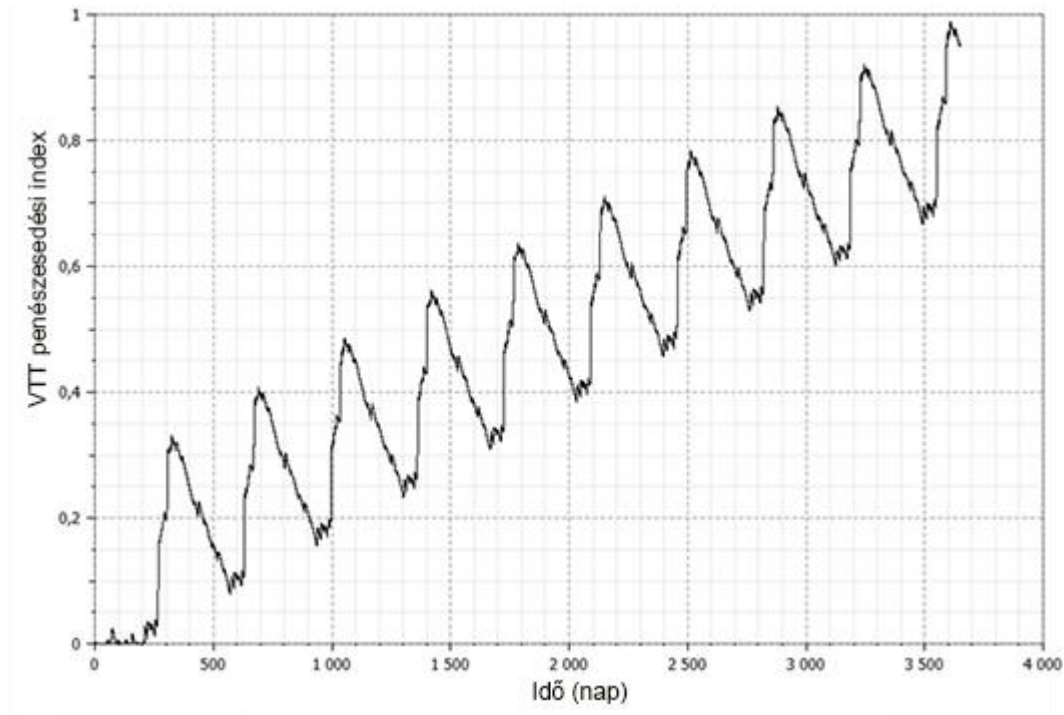
A belső oldali vizsgálatoknál - a falsarkok esetéhez hasonlóan - egyik sarokban sem jött létre penészképződés ($VTT_{max} < 0,2$).

A külső oldal esetében ugyanakkor újból változatos képet kaptunk. A mérési pontok helyeit a következő ábrák szemléltetik:



4.20_ábra. Mérés pontok

Szigeteletlen falszerkezet esetében mindkét mérési pontunk nagyon hasonló eredményeket adott: a tizedik év végére az értékek majdnem elérték a közepes kockázati szintet:

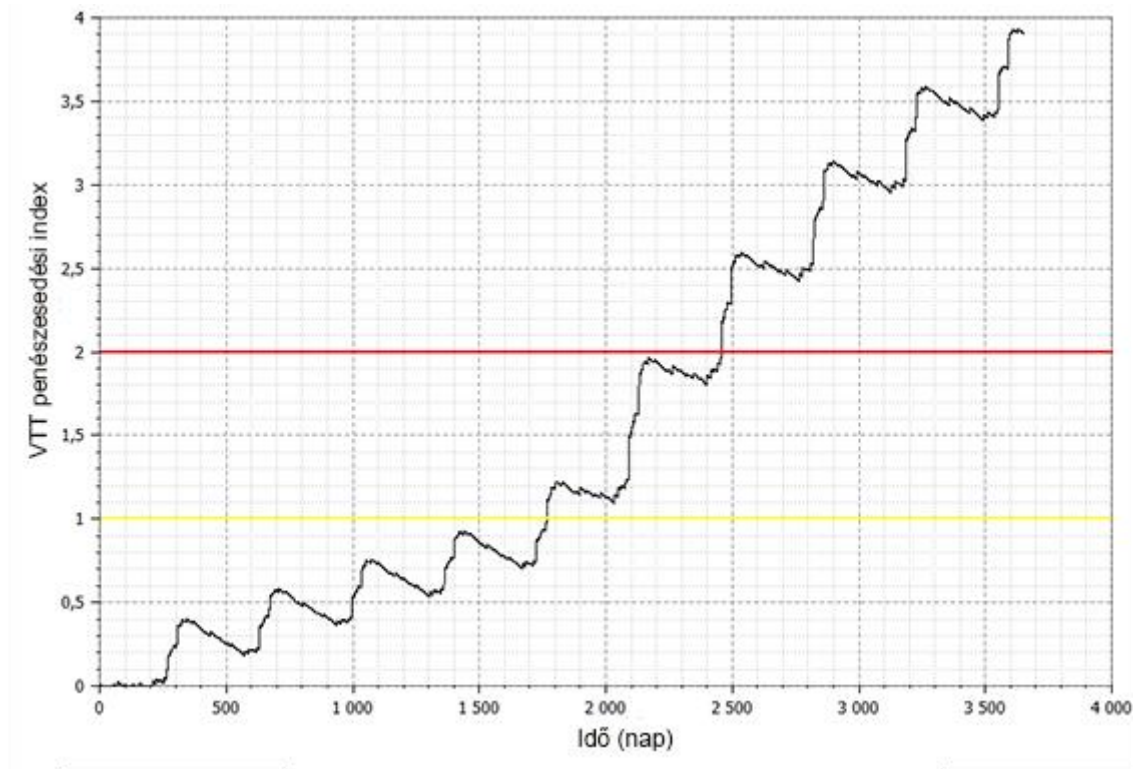


4.21_ábra. VTT penészesedési index általános külső felületen, szigeteletlen falszerkezet (1.)

A tendenciát elnézve valószínűsíthető, hogy ez a továbbiakban erőteljesebb penészképződéshez vezethet. Mivel kutatásunk több, mint százéves épületek vizsgálatát célozza, a szimulációkban lehetséges hibafaktor miatt indokoltnak látjuk további vizsgálatok végzését ezen épületek szigeteletlen homlokzatainak penészesedésével kapcsolatosan.

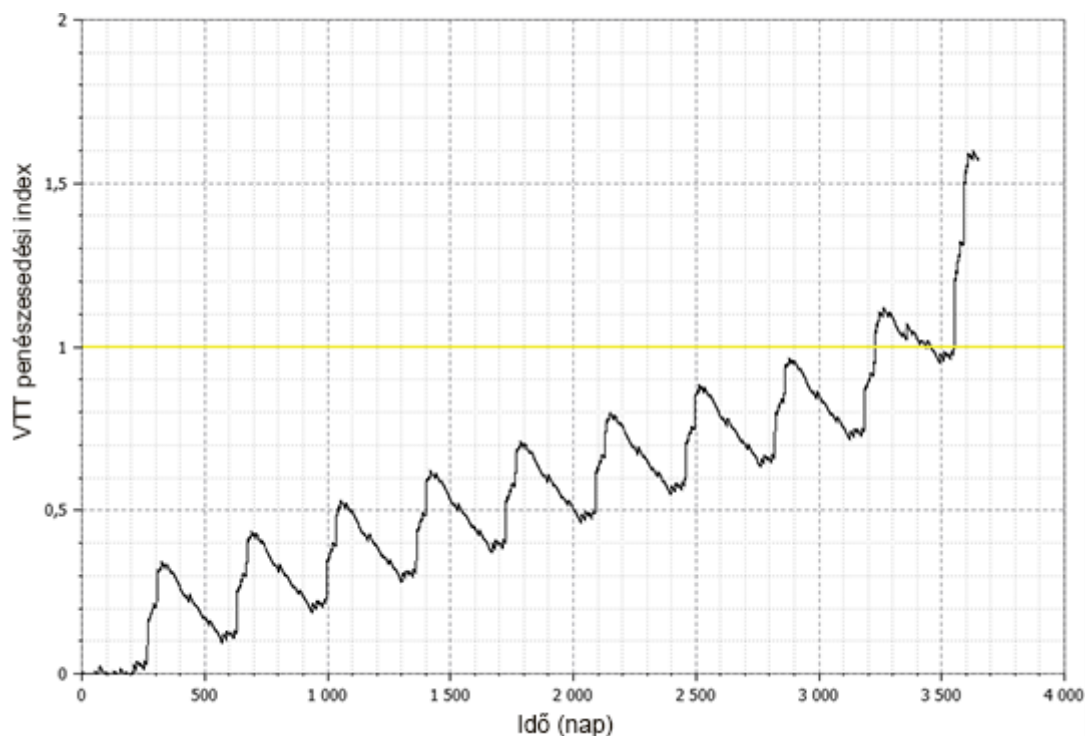
Egyoldalt szigetelt szerkezet esetében a szigetelt oldal a falsaroknál megismertekhez hasonlóan alakul: az 1-es pont esetében már a hatodik év végétől magas szintű penészesedési

kockázatról beszélhetünk, ami a szigetelt irányba haladva csak egyre gyorsabban növekvő kockázatot jelent:



4.22_ábra. VTT penészesedési index, 1-es mérőpont, egyoldalról szigetelt falszerkezet (2.)

Mindez természetesen kihatással van a szigeteletlen oldalra is: a penészesedési grafikon hasonló az szigeteletlen fal szerkezetéhez, azonban meredekebben emelkedik, és így a kilencedik év folyamán belép a közepes kockázati szintbe:



4.23_ábra. VTT penészesedési index, 2-es mérőpont, egyoldalról szigetelt csomópont (2.)

A szimuláció végén a nagyobb ugrás valamilyen rendellenességet sejtet, amivel több penészesedési diagram esetében is találkoztunk a későbbiekben.

Összevetve a szigetetlen falszerkezettel, a legfontosabb tanulság talán az, hogy a belső oldali hőszigetelés tájolástól függően széles, kiterjedt felületen is képes lehet penészesedés létrehozására; a szigetelés bütüje és a 2-es mérőpont között 35 cm a távolság.

Mindkét oldalt szigetelt szerkezet esetében az 1-es és 2-es mérőpontok a fentebbieknek megfelelő eredményekkel szolgáltak, mindemellett a penészesedés mértéke az egyes variánsok közül itt volt a legerőteljesebb.

Összefoglaló táblázat

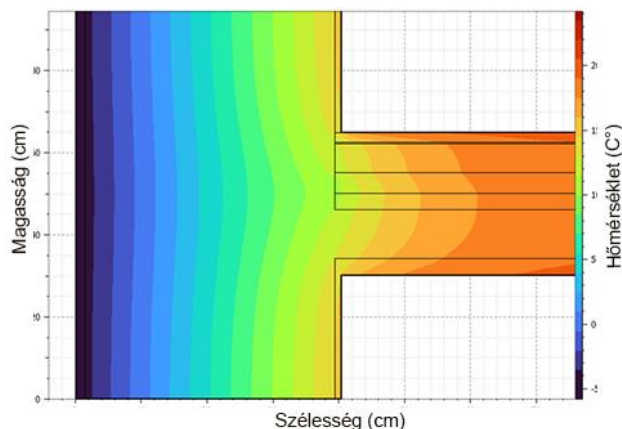
	Szigeteetlen csomópont	Egy oldalról szigetelt csomópont	Két oldalról szigetelt csomópont
Fagykár	Nincs	Nincs	Nincs
Penészesedés a sarokban	Nincs	Nincs	Nincs
Nedvesség beállta	1 év	1 év	1 év

CSP3 - Födém és külső főfal csatlakozása új, felújított padló rétegrenddel

Az eredeti rétegrendet hőszigetelő rendszer beépítésével, egy általános felújítást feltételezve, egy felújított változatot vizsgáltunk.

Vizsgálatunk során 4 csomóponti kialakítást néztünk meg.:

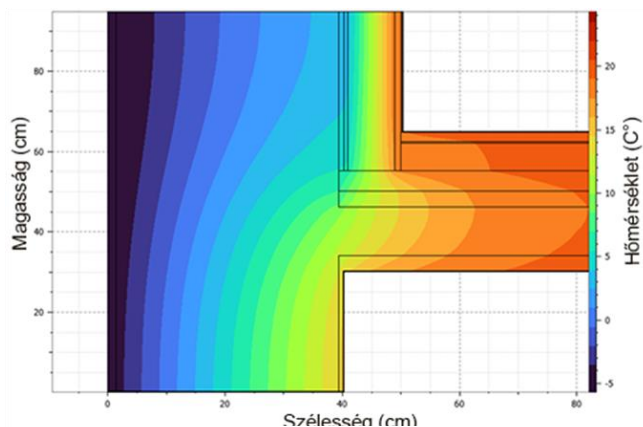
- Szigetetlen csomópont (1)
- Födém alsó síkja felől szigetelt csomópont (2)
- Padló felől szigetelt csomópont (3)



4.24. ábra. Hőmérsékleti térkép egy jellemző téli napon, szigetetlen földemcsatlakozás

3. Hőmérsékleti izotermák alakulása egy jellemző téli napon

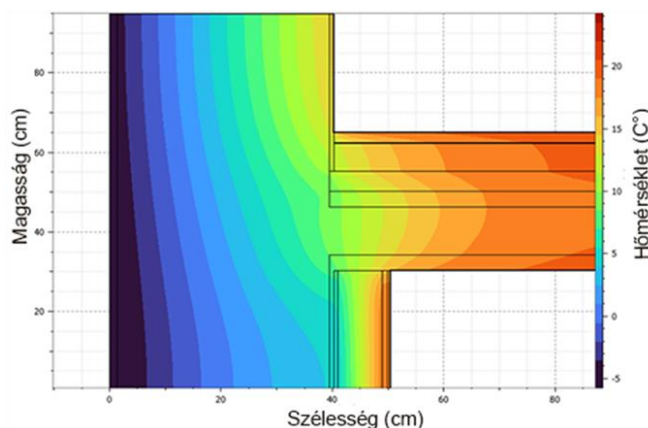
Az izotermák hasonlóan torzulnak a szigetelt földemcsatlakozásoknál, mint a lakáselválasztó fal csomópontoknál, viszont a féloldalt szigetelt változatok esetében különbség adódik a földem izotermáiban, ami a padló rétegrendjeinek eltérő hővezetési tulajdonságaira vezethető vissza.



4.25. ábra. Hőmérsékleti térkép egy jellemző téli napon, padló felől szigetelt földemcsatlakozás

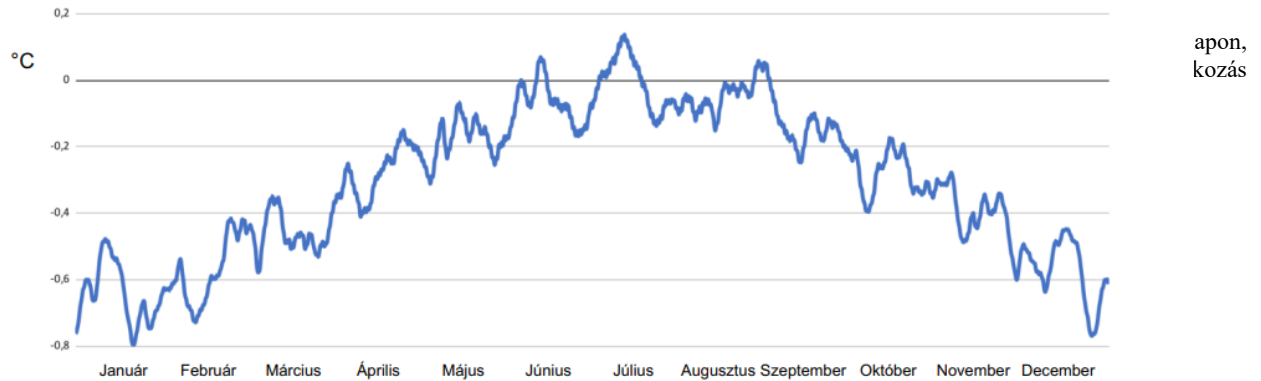
4. Hőmérséklet alakulása belső falsarokban, egy jellemző évben

(A felületi hőmérsékletek vizsgálata a sarkokban a legkritikusabb, a vonalmenti hőhíd mentén.) A mérési eredmények azt mutatják, hogy a belső oldali szigetelés telepítése után a padló menti sarokél 3-4 fokkal is melegebb lehet a téli hideg napokon. A két érték közötti jelentős



különbség a padló alatti vastag réteges szerkezet okozza, amely jó hőszigetelő képességével hozzájárul a jobb hőmérséklethez.

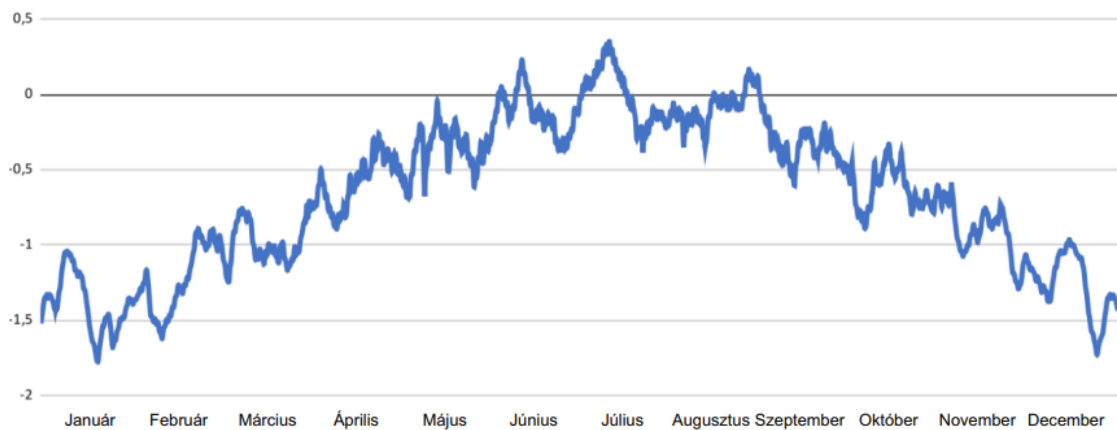
A következő ábra mutatja (3) -as szerkezet szigetelésének hatását az alsó helyiség sarokélének felületi hőmérsékletére:



4.27_ábra. Hőmérséklet változása szigetetlen sarokélben a földem felső síkjánál, felső szintű hőszigetelés telepítése után

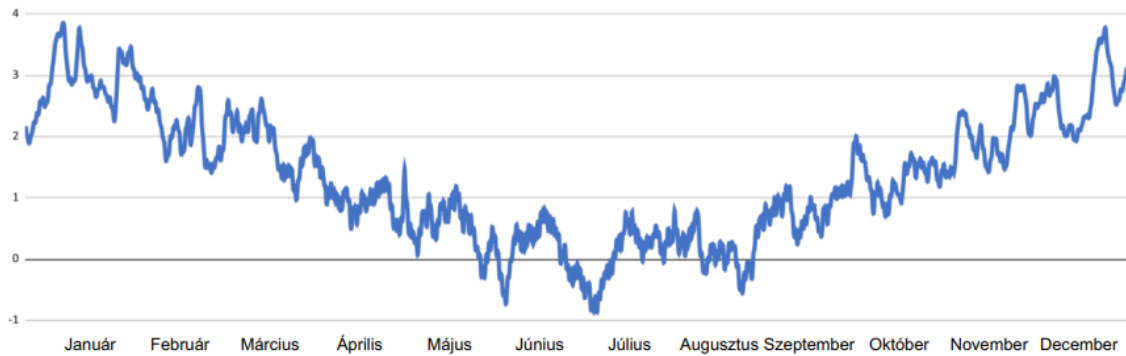
A diagram alapján a téli hónapokban a szigetetlen oldalon a hőmérséklet mintegy 0,8 fokkal lecsökkent a szigetetlen állapothoz képest.

A (2) -es változatban a hőmérsékletcsökkenés a szigetetlen fal és padló csatlakozásánál a 1,5 °C-t is meghaladta:



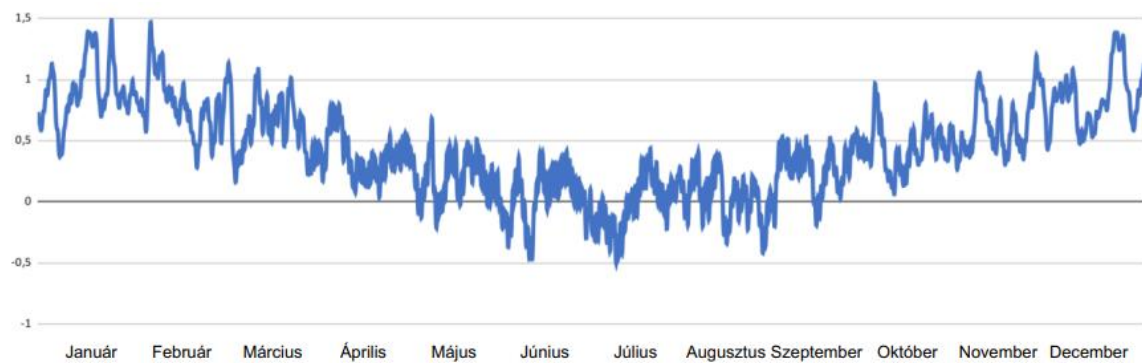
4.28_ábra. Hőmérséklet változása szigetetlen sarokélben a padlónál, alsó szintű hőszigetelés telepítése után

A (3)-as változatban akár 4 fokkal is magasabb lehet a felületi hőmérséklet a szigetelt padlóélelben:



4.29_ábra. Felületi hőmérséklet változása szigetelés után padló menti sarokélben

A (2) -es változatban mintegy másfél fokkal nő a hőmérséklet a földem alsó sarokélében:



4.30_ábra. Felületi hőmérséklet változása szigetelés után földem felső síkja menti sarokélben

Penészesedés

Elmondható, hogy a földem rétegrendje nincs erős kihatással az értékek alakulására, a séma a T csomópontokhoz nagyon hasonlóan alakul: a belső sarkok mentén a korábbiakhoz hasonlóan nem képződik penész, a külső oldalon pedig a szigetetlen szerkezet esetében enyhe, míg a szigetelt felületek esetében magas a kockázat, mely kihatással van a szigetetlen oldalra is.

Összefoglaló táblázat

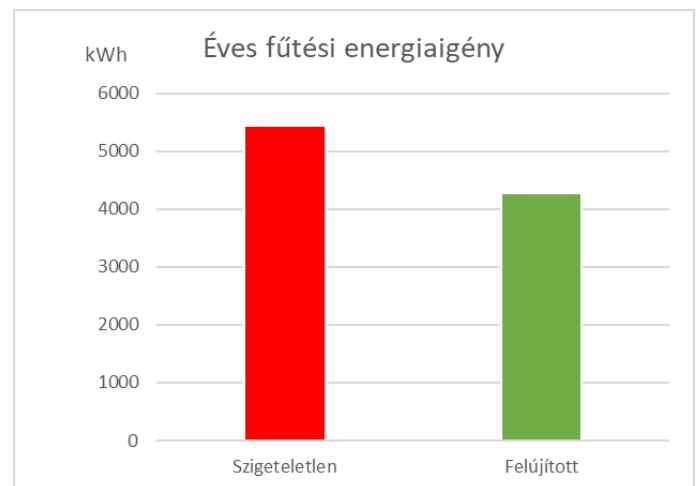
	Szigetelés nélküli csomópont	Csak fenti oldalról szigetelt csomópont	Csak lenti oldalról szigetelt csomópont	Mindkét oldalról szigetelt csomópont
Egyensúly beállta (év)	1	1	1	1
Fagykár	0	0	0	0
Penészesedés	0	0	0	0

4.3 Energiamérleg számítások és kivitelezési költségek

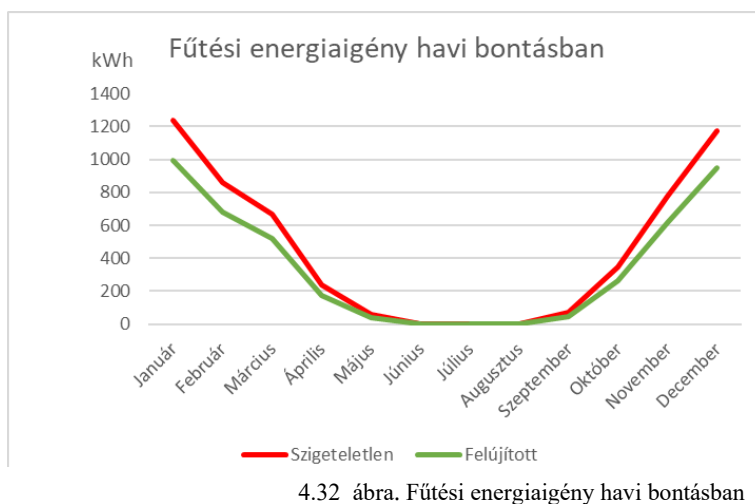
Az eredmények szerint az éves fűtési energiaigény a következőképpen alakul a szigeteletlen, illetve felújított lakásban:

- szigeteletlen lakás energiaigénye 5430 kWh
- felújított lakás energiaigénye 4279 kWh

A szimulációk alapján a belső oldali hőszigeteléssel mintegy 22%-os javulást értünk el energiaigény terén.



4.31_ábra. Éves fűtési energiaigény



4.32_ábra. Fűtési energiaigény havi bontásban

A 4.32-es ábrán pedig az energiaigény látható havi bontásban.

A jelenleg Magyarországon hatályos rendelkezések alapján a vizsgált lakás jogosult a teljes fűtési energiaigényét rezsicsökkentett áron (102Ft/m³) megvásárolni. Így

az éves fűtésszámla 65833, illetve 51876 Ft szigeteletlen, valamint felújított épület esetén. A kettő különbsége alapján elmondható, hogy a beruházás megtérülési ideje mintegy 43 év (a mai hazai lakkossági gázárakon számolva).

Eredmények értékelése, következtetés

A szimulációk alapján a különböző belső oldali hőszigetelési rendszerek különböző mértékű hőtechnikai javulást és nedvességkezelési tulajdonságokat mutatnak, amelyek közül a **kalcium-szilikát alapú szigetelés** bizonyult a leginkább megfelelőnek. Kapilláris-aktív tulajdonságainak köszönhetően ez az anyag jelentős nedvességszabályozó képességgel bír, amely nagyban hozzájárul a penészképződés elkerüléséhez. A szimulációk igazolták, hogy a kalcium-szilikát U-értékei szignifikánsan javítják az épület hőszigetelését, miközben megakadályozzák a szerkezetben fellépő káros nedvességfelhalmozódást. Azt is láttuk, hogy alkalmazásuk jelentősen javítja a belső komfortérzetet, több fokkal is magasabb hőmérsékletet kaphatunk egy alsó vagy felső sarokél mentén szigetelés után. A **farostlemezek** szintén hatékonyak bizonyultak, különösen magasabb páratelhelés esetén, ahol a belső térben időszakosan emelkedhet a páratartalom (pl. konyhák, fürdőszobák). Kapilláris-aktív és páraáteresztő képességeik révén ezek az anyagok szabályozzák a páratartalmat, csökkentve a páralecsapódás kockázatát. Ezzel szemben a **fújó cellulóz szigetelés** használata több kihívással jár a párazárás területén, mivel a megfelelő párazáró réteg nélkül a szerkezetben nedvesség halmozódhat fel, különösen a csatlakozásoknál és az ablakkávák környékén. Mellette szól viszont rendkívül kedvező ára, hiszen gyakorlatilag a többi rendszer feléért meg lehet kapni. Fontos további eredmény, hogy belső oldali penészesedés a gyakorlatilag sehol nem volt számottevő, bár a farostlemeznél látható volt egy veszélyes tendencia.

Az eredmények alapján a kalcium-szilikát szigetelés kiemelkedően hatékonyak bizonyult a budapesti historizáló épületek belső szigeteléséhez, azonban a farost szigetelés szintén megbízható, és költséghatékonyabb alternatívát jelenthet párásabb helyiségekben.

5.Összefoglalás

Kutatásunk eredményei alapján megállapíthatjuk, hogy a megfelelő belső hőszigetelés körülmintő alkalmazásával jelentős mértékben lehet javítani a historizáló épületek hőtechnikai teljesítményét és belső komfortérzetét anélkül, hogy az épület szerkezeti integritását veszélyeztetné. A kálcium-szilikát szigetelésnek köszönhetően különösen alkalmasnak bizonyult, hozzájárulva a komfortos belső környezet fenntartásához. A farost szigetelés a nagyobb páratérhelésű helyiségek számára ideális választásnak tűnik, míg a fűjt cellulóz bár jó hőszigetelő anyag, kivitelezéséhez nagy körültekintés szükséges, különösen a párazáró réteg kialakításakor. Fontos kiemelni, hogy a belső oldali hőszigetelések alkalmazása további vizsgálatokat igényel, hiszen a hőszigetelő rendszer kiválasztása az épület, lakás, sőt helyiség egyedi szerkezeti tulajdonságainak és a nedvességi terhelés alapos ismeretében végezhető el. Indokolt további vizsgálatokat végezni az ablakbeépítésekre és az ablakok környezetének hőszigetelési megoldására, mivel a homlokzati nyílászárók jelentős szerepet játszanak a komfortérzet és a levegő páratartalmának változásában is, különösen a filtráció és az esetleges hőhidak vonatkozásában.

Irodalomjegyzék

- [1] ITM, Innovációs és Technológiai Minisztérium (2021). Hosszú Távú Felújítási Stratégia az (EU) 2018/844 számú irányelve alapján a 2021–2027 közötti kohéziós célú támogatások kifizetését lehetővé tevő feljogosító feltételek teljesítése céljából (HTFS). Letöltve: 2024. október 11., elérhető: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2021-07/hu_2020_ltrs_0.pdf.
- [2] MEHI (2020). Az energiahatékonyságról Magyarországon. Magyar Energhatékonsági Intézet. Letöltve: 2024. október 11., elérhető: <https://mehi.hu/az-energhatekonysagrol-magyarorszagon/>.
- [3] HuGBC (2023). RetrofitHUB – Útmutató a fenntartható épületfelújításokhoz. Hungary Green Building Council. Letöltve: 2024. október 11., elérhető: https://www.hugbc.hu/resources/docs/HuGBC_RetrofitHUB_HU_online.pdf.
- [4] Gevorgian, A. et al (2021). European Building Stock Analysis. Bolzano: Eurac Research
- [5] Körner Zsuzsa, PhD (2015). A budapesti bérházépítés aranykora. Ingatlanfejlesztői Kerekasztal Egyesület.
- [6] Perényi, T. et al. (2016). Historikus városi szövet megújítása. Budapest: BME ÉPK Lakóépülettervezési Tanszék.
- [7] Dr. Fekete Iván (1985). Épületfizika kézikönyv. Budapest: Műszaki könyvkiadó
- [8] Ingo Fuchs, Heiko Riggert, Ralf Pasker (2013): Leitfaden Innendämmung, Deutsche BauZeitschrift. Letöltve: 2024. augusztus 8., elérhető: <https://www.dbz.de/download/1243702/leitfaden-innendaemmung.pdf>
- [9] Energie-experten.org. A belső szigetelés hátrányai. Letöltve: 2024. október 11., elérhető: <https://www.energie-experten.org/bauen-und-sanieren/daemmung/innendaemmung/nachteile#c8762>.
- [10] Oswald, R., Zöller, M., Liebert, G., & Sous, S. (2011). Baupraktische Detaillösungen für Innendämmungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

- [11] Sanier.de. Belső fal szigetelés. Letöltve: 2024. október 11., elérhető: <https://www.sanier.de/innenausbau/innenwanddaemmung>.
- [12] Wolf, U. (2022). Schlagregenschutz und Innendämmung. Letöltve: 2024. október 11., elérhető: <https://www.ausbaupraxis.de/schlagregenschutz-und-innendaemmung-aussen-dicht--innen-warm-17112021>.
- [13] Gregor A. Scheffler, Torsten Schoch, Kloster Lehnin (2023). Diffusionsoffen und kapillaraktiv – Energetische Innenwand-Sanierung. Letöltve: 2024. október 11.
- [14] V.d.L. (2021). Innendämmung. Letöltve: 2024. október 11., elérhető: https://www.vdl-denkmalfpflege.de/fileadmin/dateien/Arbeitshefte/VdL_Arbeitsheft_02_Innend%C3%A4mmung_2021_09_06.pdf.
- [15] Worch, A. (2021). Kondenzatbegrenzende Innendämmsysteme. Letöltve: 2024. október 11., elérhető: <https://bauphysik-worch.de/kondensatbegrenzende-innendaemmsysteme/>.
- [16] Worch, A. (2021). Kondenzatverhindernde Innendämmsysteme. Letöltve: 2024. október 11., elérhető: <https://bauphysik-worch.de/kondensatverhindernde-innendaemmsysteme/>.
- [17] Ruisinger, U., & Grunewald, J. (2009). Feuchteatlas zur Vermeidung Planungsbedingter Feuchteschäden. Drezda: Institut für Bauklimatik, TU Dresden.
- [18] Xella (2024). Multipor – Általános információk és alkalmazási útmutató. Letöltve: 2024. október 11., elérhető: https://storefrontapi.commerce.xella.com/medias/sys_master/images/h14/h65/9211418542110/Multipor_2024-07-10_WEB/Multipor-2024-07-10-WEB.pdf.
- [19] Steico (2023). STEICOinternal - A fenntartható belső szigetelés. Letöltve: 2024. október 11., elérhető: https://www.steico.com/fileadmin/user_upload/importer/downloads/4028b6097384810e01749c3c49bb7b91/STEICOinternal_en_i.pdf.pdf.
- [20] Steico (2024). Verarbeitungshinweise für STEICOinternal. Letöltve: 2024. október 15., elérhető: https://www.steico.com/fileadmin/user_upload/importer/downloads/4028b69b84b29d4a01850610a21e5fbf/STEICO_Verarbeitung_internal_de_i.pdf
- [21] Andreas Nicolai (2013). Physikalische Grundlagen des thermischen Raummodells THERAKLES. Drezda: Institut für Bauklimatik, TU Dresden. Elérhető: <https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A26372/attachment/ATT-0/>
- [22] Fechner, H. (2024). Hygrothermal assessment of constructions. Drezda: Institut für Bauklimatik, TU Dresden.
- [23] Weinhardt Attila, Portfolio (2024). Marad a rezsivédett lakossági gázár októbertől. Letöltve: 2024. október 15., elérhető: <https://www.portfolio.hu/uzlet/20240926/marad-a-rezsivedett-lakossagi-gazar-oktobertol-712559>.
- [24] Dr. Csoknyai Tamás és Dr. Horváth Miklós (2022). Teljesítménytényező meghatározása részletes módszerrel. Budapest: BME Épületenergetikai és Épületgépészeti Tanszék. Letöltve: 2024. október 28., elérhető: https://bpmkkepzesek.hu/images/Hotermelok_hatasfoka_BPMK_HM.pdf
- [25] MET (2024). A földgáz fűtőértéke. Letöltve: 2024. október 15., elérhető: <https://hu.met.com/hu/mind-the-future/energiapiaci-betekinto/a-foldgaz-futoerteke>
- [26] Karácsony Tiborné (2024) Építőipari Költségbecslési Segédlet. Budapest: Építésügyi Tájékoztatási Központ Kft.
- [27] 9/2023. (V. 25.) ÉKM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról, 2023 <https://njt.hu/jogszabaly/2023-9-20-8X>