



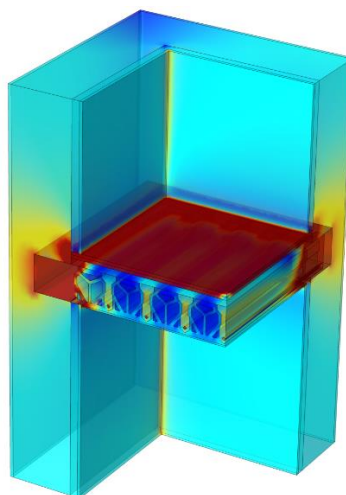
Budapesti Műszaki-és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Építőanyagok- és Magasépítés Tanszék

MSc Diplomamunka

**Történeti épületek fűdészerkezeteinek higrotermikus
elemzése és energiahatékonysági célú felújítási lehetőségei**



Készítette:

Petresevics Fanni, LM25TC, MSc hallgató

Konzulensek:

Dr. Nagy Balázs

Dr. Déry Attila

Budapest, 2022.12.16.

Tartalom

1. Ábrajegyzék	4
2. Táblázatjegyzék	6
3. Absztrakt	8
3.1. Absztrakt	8
3.2. Summary	9
4. Bevezetés	11
5. Szakirodalmi áttekintés, alapismeretek	13
5.1. Vizsgált hagyományos födémszerkezetek bemutatása	13
5.1.1. Poroszsüveg födém	16
5.1.2. Monier-födém	18
5.1.3. Horcsik- (Kleine-) födém	19
5.1.4. Bohn-födém	20
5.1.5. E-gerendás födém	21
5.2. Kapcsolt hő- és nedvességtranszport modellezés	22
5.2.1. Méretezési szabványok	24
6. Modellezés és szimuláció	25
6.1. Födémek modellezése	26
6.1.1. Rétegrendi kialakítások	27
6.1.2. Fal rétegrendi kialakítása	28
6.1.3. Felújítási opciók rétegrendi kialakításai	29
6.2. Anyagtulajdonságok	29
6.2.1. Történeti szerkezetek anyagtulajdonságai	30
6.2.2. Felújított szerkezetek anyagtulajdonságai	31
6.3. Numerikus számítási módszer, fizika	34
6.3.1. Hőtranszport	34
6.3.2. Nedvességtranszport	36
7. Szimulációk kiértékelésének módszertana	38
7.1. Többlet hőveszteség meghatározása	38

7.2. Saját léptékben mért hőmérséklet	40
7.3. Anyagok hővezetési tényezőjének változása	41
8. Történeti fűdémszerkezetek eredményei	42
8.1. Hőtechnikai szimulációk eredményei	42
8.2. Hígrotermikus szimulációk eredményei	43
8.3. Eredmények vizualizálása	47
8.4. Eredmények kiértékelése, összehasonlítása	52
8.4.1. Ψ vonalmenti hőátbocsátási tényezők összehasonlítása	53
8.4.2. L3D csomóponti 3D-s hőátbocsátási tényezők összehasonlítása	54
8.4.3. χ többlet hőveszteségek összehasonlítása	55
8.4.4. f_{Rsi} saját léptékben mért hőmérsékletek összehasonlítása	56
8.4.5. λ hővezetési tényezők összehasonlítása	56
9. Energiahatékonysági célú felújítás lehetőségei	69
9.1. Felújítási opciók eredményei	69
9.2. Eredmények vizualizálása	72
9.3. Eredmények kiértékelése	76
9.4. Csomóponti részletrajzok	83
10. Összefoglalás	84
11. Irodalomjegyzék	86

1. Ábrajegyzék

1. ÁBRA: BUDAPESTI NAGYPOLGÁRI LAKÓHÁZAK (FOTÓ: MAJOR KATA - WE LOVE BUDAPEST)	11
2. ÁBRA: MEGÉPÜLT POROSZSÜVEG FÖDÉM (FOTÓ: KVARC ÉPÍTÉSZ STÚDIÓ)	16
3. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM VÁZLATOS ÁBRÁJA (SAJÁT ÁBRA).....	17
4. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM VÁZLATOS ÁBRÁJA (SAJÁT ÁBRA).....	19
5. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM VÁZLATOS ÁBRÁJA (SAJÁT ÁBRA).....	19
6. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM VÁZLATOS ÁBRÁJA (SAJÁT ÁBRA)	20
7. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM VÁZLATOS ÁBRÁJA (SAJÁT ÁBRA)	21
8. ÁBRA: NEDVESSÉGÁRAM ELOSZLÁS ÁBRA FA FÖDÉM-FAL CSATLAKOZÁS ESETÉBEN [29]	23
9. ÁBRA: HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ VÁZLATOS FOLYAMATÁBRÁJA [14]	25
10. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM KÜLÖNBÖZŐ KIALAKÍTÁSÚ GEOMETRIAI MODELLJEI	27
11. ÁBRA: VAKOLAT, HABARCS, BETON, VASBETON ÉS ÉGETETT KERÁMIA NEDVESSÉGTÁROLÓ KÉPESSÉGE.....	31
12. ÁBRA: FA ÉS SALAKFELTÖLTÉS NEDVESSÉGTÁROLÓ KÉPESSÉGE	31
13. ÁBRA: XELLA MULTIPOR HŐSZIGETELŐ RENDSZER [43].....	32
14. ÁBRA: BELSŐ OLDALI HŐSZIGETELÉS NEDVESSÉGTÁROLÓ KÉPESSÉGE	33
15. ÁBRA: HŐSZIGETELŐ VAKOLAT NEDVESSÉGTÁROLÓ KÉPESSÉGE	33
16. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	47
17. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	47
18. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	48
19. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	48
20. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	48
21. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	48
22. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	48
23. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	48
24. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	49
25. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	49
26. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	49
27. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN.....	49
28. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	49
29. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	49
30. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	50
31. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	50
32. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	50
33. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	50
34. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	50
35. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	50
36. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN.....	51
37. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN.....	51
38. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	51
39. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	51
40. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN.....	51
41. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	51

42. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMÍKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN.....	52
43. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA HIGROTERMÍKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	52
44. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMÍKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	52
45. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMÍKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	52
46. ÁBRA: HŐTECHNIKAI ÉS HIGROTERMÍKUS SZIMULÁCIÓK Ψ_{2DPARH} HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	53
47. ÁBRA: HŐTECHNIKAI ÉS HIGROTERMÍKUS SZIMULÁCIÓK Ψ_{2DMER} HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	53
48. ÁBRA: HŐTECHNIKAI ÉS HIGROTERMÍKUS SZIMULÁCIÓK L3D 3D-S CSOMÓPONTI HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	54
49. ÁBRA: HŐTECHNIKAI ÉS HIGROTERMÍKUS SZIMULÁCIÓK X TÖBBLET HŐVESZTESÉGEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	55
50. ÁBRA: HŐTECHNIKAI ÉS HIGROTERMÍKUS SZIMULÁCIÓK F_{RSI} SAJÁT LÉPTÉKBEN MÉRT HŐMÉRSÉKLETEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	56
51. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA POROSZSŰVEG FÖDÉM TELJES CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	57
52. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA POROSZSŰVEG FÖDÉM TEHERHORDÁSI IRÁNYRA MERŐLEGES CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	57
53. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA POROSZSŰVEG FÖDÉM TEHERHORDÁSI IRÁNNYAL PÁRHUZAMOS CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	58
54. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA POROSZSŰVEG FÖDÉM FALSAROK CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR.....	58
55. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA MONIER-FÖDÉM TELJES CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR.....	59
56. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA MONIER-FÖDÉM TEHERHORDÁSI IRÁNYRA MERŐLEGES CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	59
57. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA MONIER-FÖDÉM TEHERHORDÁSI IRÁNNYAL PÁRHUZAMOS CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	60
58. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA MONIER-FÖDÉM FALSAROK CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	60
59. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA HORCSIK-FÖDÉM TELJES CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR.....	61
60. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA HORCSIK-FÖDÉM TEHERHORDÁSI IRÁNYRA MERŐLEGES CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	61
61. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA HORCSIK-FÖDÉM TEHERHORDÁSI IRÁNNYAL PÁRHUZAMOS CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	62
62. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA HORCSIK-FÖDÉM FALSAROK CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	62
63. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA BOHN-FÖDÉM TELJES CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR.....	63
64. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSI IRÁNYRA MERŐLEGES CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	63
65. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSI IRÁNNYAL PÁRHUZAMOS CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	64
66. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA BOHN-FÖDÉM FALSAROK CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR.....	64
67. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA E-GERENDÁS FÖDÉM TELJES CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	65
68. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA E-GERENDÁS FÖDÉM TEHERHORDÁSI IRÁNYRA MERŐLEGES CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	65
69. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA E-GERENDÁS FÖDÉM TEHERHORDÁSI IRÁNNYAL PÁRHUZAMOS CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	66
70. ÁBRA: HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK VÁLTOZÁSA E-GERENDÁS FÖDÉM FALSAROK CSOMÓPONTI KIALAKÍTÁSAKOR	66
71. ÁBRA: FELÚJÍTOTT POROSZSŰVEG FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA.....	73

72. ÁBRA: FELÚJÍTOTT POROSZSÚVEG FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	73
73. ÁBRA: FELÚJÍTOTT POROSZSÚVEG FÖDÉM NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA	73
74. ÁBRA: FELÚJÍTOTT POROSZSÚVEG FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	73
75. ÁBRA: FELÚJÍTOTT MONIER-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	74
76. ÁBRA: FELÚJÍTOTT MONIER-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA.....	74
77. ÁBRA: FELÚJÍTOTT MONIER-FÖDÉM NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA	74
78. ÁBRA: FELÚJÍTOTT MONIER-FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	74
79. ÁBRA: FELÚJÍTOTT HORCSIK-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	74
80. ÁBRA: FELÚJÍTOTT HORCSIK-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	74
81. ÁBRA: FELÚJÍTOTT HORCSIK-FÖDÉM NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA.....	75
82. ÁBRA: FELÚJÍTOTT HORCSIK-FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA.....	75
83. ÁBRA: FELÚJÍTOTT BOHN-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	75
84. ÁBRA: FELÚJÍTOTT BOHN-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	75
85. ÁBRA: FELÚJÍTOTT BOHN-FÖDÉM NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA.....	75
86. ÁBRA: FELÚJÍTOTT BOHN-FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA.....	75
87. ÁBRA: FELÚJÍTOTT E-GERENDÁS FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA.....	76
88. ÁBRA: FELÚJÍTOTT E-GERENDÁS FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA.....	76
89. ÁBRA: FELÚJÍTOTT E-GERENDÁS FÖDÉM NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA	76
90. ÁBRA: FELÚJÍTOTT E-GERENDÁS FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	76
91. ÁBRA: TELJES HŐÁRAMOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA EGYES FÖDÉMTÍPUSOK FELÚJÍTÁSI VÁLTOZATAINÁL.....	77
92. ÁBRA: 3D-S CSP-I HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐK ÖSSZEHASONLÍTÁSA EGYES FÖDÉMTÍPUSOK FELÚJÍTÁSI VÁLTOZATAINÁL	78
93. ÁBRA: FAL HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐJÉNEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA EGYES FELÚJÍTÁSI VÁLTOZATOK ESETÉBEN	79
94. ÁBRA: SAJÁT LÉPTÉKBEN MÉRT HŐMÉRSÉKLETEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA EGYES FÖDÉMTÍPUSOK FELÚJÍTÁSI VÁLTOZATAINÁL..	80
95. ÁBRA: VONALMENTI HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐK ÖSSZEHASONLÍTÁSA TEHERHORDÁSI IRÁNYRA MERŐLEGESEN EGYES FÖDÉMTÍPUSOK FELÚJÍTÁSI VÁLTOZATAINÁL	81
96. ÁBRA: VONALMENTI HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐK ÖSSZEHASONLÍTÁSA TEHERHORDÁSI IRÁNNYAL PÁRHUZAMOSAN EGYES FÖDÉMTÍPUSOK FELÚJÍTÁSI VÁLTOZATAINÁL	82

2. Táblázatjegyzék

1. TÁBLÁZAT: SZIMULÁCIÓHOZ SZÜKSÉGES ANYAGTULAJDONSÁGOK	31
2. TÁBLÁZAT: FELÚJÍTÁSKOR ALKALMAZOTT ANYAGOK HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓJÁHOZ SZÜKSÉGES ANYAGTULAJDONSÁGAI	33
3. TÁBLÁZAT: HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓKBÓL KAPOTT ADATOK	42
4. TÁBLÁZAT: HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓKBÓL SZÁMOLT EREDMÉNYEK.....	42
5. TÁBLÁZAT: HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓKBÓL KAPOTT ADATOK	43
6. TÁBLÁZAT: HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓKBÓL SZÁMOLT EREDMÉNYEK	43
7. TÁBLÁZAT: POROSZSÚVEG FÖDÉM CSOMÓPONTJAIKA KAPOTT ÁTLAGOS HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ, NEDVESSÉGTARTALOM ÉS HŐMÉRSÉKLET ÉRTÉKEK.....	44
8. TÁBLÁZAT: MONIER-FÖDÉM CSOMÓPONTJAIKA KAPOTT ÁTLAGOS HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ, NEDVESSÉGTARTALOM ÉS HŐMÉRSÉKLET ÉRTÉKEK.....	44

9. TÁBLÁZAT: HORCSIK-FÖDÉM CSOMÓPONTJAIKA KAPOTT ÁTLAGOS HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ, NEDVESSÉGTARTALOM ÉS HŐMÉRSÉKLET ÉRTÉKEK.....	45
10. TÁBLÁZAT: BOHN-FÖDÉM CSOMÓPONTJAIKA KAPOTT ÁTLAGOS HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ, NEDVESSÉGTARTALOM ÉS HŐMÉRSÉKLET ÉRTÉKEK.....	46
11. TÁBLÁZAT: E-GERENDÁS FÖDÉM CSOMÓPONTJAIKA KAPOTT ÁTLAGOS HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ, NEDVESSÉGTARTALOM ÉS HŐMÉRSÉKLET ÉRTÉKEK.....	46
12. TÁBLÁZAT: POROSZSÜVEG FÖDÉM ANYAGAINAK HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐINEK %-OS ELTÉRÉSE	67
13. TÁBLÁZAT: MONIER-FÖDÉM ANYAGAINAK HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐINEK %-OS ELTÉRÉSE	67
14. TÁBLÁZAT: HORCSIK-FÖDÉM ANYAGAINAK HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐINEK %-OS ELTÉRÉSE	67
15. TÁBLÁZAT: BOHN-FÖDÉM ANYAGAINAK HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐINEK %-OS ELTÉRÉSE.....	67
16. TÁBLÁZAT: E-GERENDÁS FÖDÉM ANYAGAINAK HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐINEK %-OS ELTÉRÉSE	67
17. TÁBLÁZAT: EREDETI RÉTEGRENDEK HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓJÁBÓL SZÁRMAZÓ EREDMÉNYEK	70
18. TÁBLÁZAT: 1. FELÚJÍTÁSI VÁLTOZAT HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓJÁBÓL SZÁRMAZÓ EREDMÉNYEK	70
19. TÁBLÁZAT: 2. FELÚJÍTÁSI VÁLTOZAT HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓJÁBÓL SZÁRMAZÓ EREDMÉNYEK	70
20. TÁBLÁZAT: 3. FELÚJÍTÁSI VÁLTOZAT HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓJÁBÓL SZÁRMAZÓ EREDMÉNYEK	71
21. TÁBLÁZAT: 4. FELÚJÍTÁSI VÁLTOZAT HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓJÁBÓL SZÁRMAZÓ EREDMÉNYEK	71
22. TÁBLÁZAT: 5. FELÚJÍTÁSI VÁLTOZAT HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓJÁBÓL SZÁRMAZÓ EREDMÉNYEK	71
23. TÁBLÁZAT: 6. FELÚJÍTÁSI VÁLTOZAT HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓJÁBÓL SZÁRMAZÓ EREDMÉNYEK	72

3. Absztrakt

3.1. Absztrakt

Magyarország meglévő épületállományának számottevő részét a 19. és 20. században elterjedt hagyományos technológiákkal készült épületek alkotják. Az 1800-as évek elején a fafödémek és boltozatok voltak a fő vízszintes teherhordó szerkezetek, a század második felében megjelentek a hajlított acélgerendákból készült különböző födémek. Az 1910-es évekre pedig kifejlődött a mai gyakorlatban vasbetonnak nevezett anyag, így a következő évtizedekben a világháborúk hatására elindulnak a próbálkozások az előregyártás felé és kialakulnak az előfeszített, valamint zsaluzóelemes födém rendszerek. Ezek az olykor több, mint 100 éves födémek azonban egyre kevésbé képesek kielégíteni napjainkban a folyamatosan változó igényeket, előírásokat. Az építések során a minőségi építőanyagok hiánya miatt bevett szokás volt, hogy nem a megadott anyagokból, nem a kiírt rétegrend alapján készültek el a szerkezetek, így jellemzően már egy egyszerűnek vélt felújítási munkálat során is problémás lehet ezen szerkezetek rekonstrukciója.

A jelenleg érvényben lévő 7/2006-os TNM rendelet értelmében a felújítandó épületszerkezeteknek is meg kell felelniük a hőtechnikai követelményeknek, azonban a jellemzően ismeretlen rétegrendi felépítés miatt ezen hagyományos épületszerkezetek energetikai ellenőrzése sokszor nehézségekbe ütközik. A rekonstrukciós munkálatokra sok esetben funkcióváltás miatt kerül sor, amely hatására különböző külső és belső nedvességhatások érhetik a szerkezetet. Nagyvárosi bérházakra jellemző tetőtérbeépítések esetében a korábban zárófödémként funkcionáló szerkezet közbenső födém szerepét veszi át, így megváltoznak a szerkezetet érő hatások. Az épület használata során keletkező, a párávándorlás során kicsapódott nedvesség és a kezdeti építési nedvesség is jelentős nedvességtechnikai teher az épületszerkezetekre nézve. Dolgozatomban a hazai gyakorlatban leginkább elterjedt hagyományos födém típusok (Monier-födém, Horcsik-födém, poroszsüveg födém, Bohn-födém, E-gerendás födém) higrotermikus szimulációját végeztem el, melyek segítségével megvizsgáltam a födémek hő- és nedvességtechnikai tulajdonságait. A vizsgálatokhoz először elkészítettem a választott födém típusok 3D-s fal-födém csatlakozások csomópontjainak geometriai modelljét, majd pedig Comsol Multiphysics véges elemes numerikus multifizikai szoftver segítségével lefuttattam a szimulációkat.

A kutatás keretében vizsgált, hagyományos födémszerkezetekre kapott hő-és nedvességtechnikai jellemzők hasznosíthatóak az épületenergetikai számítások során, valamint hozzájárulnak a hagyományos födémszerkezetek megfelelő rekonstrukciós munkálatainak elvégzéséhez.

3.2. Summary

A significant part of Hungary's existing building stock is made up of buildings built in the 19th and 20th centuries using traditional technologies. At the beginning of the 1800s, wooden slabs and domes were the main horizontal load-bearing structures, in the second half of the century various slabs made of bent steel beams appeared. By the 1910s, the material known in today's practice as reinforced concrete had developed, so in the following decades, as a result of the World Wars, attempts were made towards pre-fabrication that led to the development of prestressed and formwork slab systems. However, these sometimes more than 100-year-old slabs are rarely able to satisfy today's constantly changing needs and specifications. Due to the lack of quality building materials during the constructions, it was a common practice that the structures were not made of the specified materials, not based on the published layer order, so the reconstruction of these structures can typically be problematic even during an apparently simple renovation work.

According to the Hungarian 7/2006 TNM regulations the building structures to be renovated must also comply with the thermal requirements, however, due to the typically unknown layered structure, the verification of energetic conformity of these traditional building structures often encounters difficulties. In the case of attic installations typical of apartment buildings in big cities, the structure that previously functioned as a closing slab takes over the role of an intermediate slab, so the effects on the structure change. Moisture generated during the use of the building, condensation and the initial construction moisture also have significant effect on building structures. In many cases, the reconstruction works are carried out due to a change of function, which can cause various external and internal moisture effects to affect the structure. In my thesis, I performed a hygrothermal simulation of the most common traditional slab types in domestic practice (Monier slab, Horcsik (Kleine) slab, Prussian slab, Bohn slab, E-beam slab). With the help of the results of the numerical simulations I examined the heat and moisture transport properties of the slabs. Firstly I created the geometric model of the 3D wall-slab

connections of the selected slab types in advance, and then I ran the simulations using Comsol Multiphysics finite element numerical multiphysics software.

The material datas related to heat and moisture transport obtained for traditional slab structures examined in the framework of this research can be used during building thermal calculations and contribute to the completion of appropriate reconstruction works of traditional slab structures.

4. Bevezetés

A 19. század végére Budapest világvárossá nőtte ki magát, amely hatására drasztikusan megnövekedett az ország lakásállománya, az épületek szorosan egymás mellé épültek, valamint megjelentek a többszintes lakóházak is. Magyarországon az építőipar államosítása előtt a hazai kivitelező cégek és tervezők számos különféle fűdém szerkezetet alakítottak ki, sok esetben külföldi példák



**1. ábra: Budapesti nagypolgári lakóházak
(fotó: Major Kata - We Love Budapest)**

alapján. Az 1867-es külföldi szabadalmaztatás után egyre jobban elterjedt a vasbeton, mint építőanyag használata, ezzel együtt lassan kikezdte a fafűdémek addigi hozzávetőleges egyeduralmát. 1909-ben megjelent az első magyarországi vasbeton szabvány, amelytől kezdve a kísérletezéseket felválthatta a szabályozott alkalmazás. Az I. világháborúig még zárófűdémként alkalmaztak sűrűgerendás fafűdémeket annak tömörsége és tűzgátló képessége miatt, de az 1920. évi békediktátum eredményeképp az ország fakitermelő erdői elcsatolásra kerültek, emiatt a fafűdémek építése egyre jelentéktelenebbé vált.

A klímaváltozás és a drasztikusan csökkenő energiahordozó készletek miatt egyre több szakértő kezdett el foglalkozni a szerkezetek, épületek hőtechnikai tulajdonságaival, hogy az épületeinknek jobb legyen a hőátbocsátási tényezőjének értéke, mely hatására kisebb lesz a hőveszteség, mely magában hordozza a csökkenő fenntartási költségeket is. Az elmúlt években sok változás történt az épületenergetika területén, részben a műszaki fejlődés, részben az irányelvek és rendeletek változása miatt. A szigorodó előírások eredményeképp egyre több esetben válik szükségessé a meglévő fűdém szerkezetek megerősítése, felújítása, javítása. A jelenlegi szabványok és jogszabályok előírják, hogy a korábbi időszakokban épített épületeknek is meg kell felelni a mai modern követelmények előírásainak. Azonban a hőátbocsátási tényezőn túl jelenleg nincs sem a vonalmenti hőátbocsátási tényezőkre vonatkozóan, sem pedig a nedvességtranszportra vonatkozóan előírt nedvességtechnikai követelmény. Az épületeink hőveszteségeinek számítása során a hőátbocsátási tényezők mellett a vonalmenti hőátbocsátási tényezők segítségével leírt hőhidak hatását is figyelembe kell vennünk azokon a helyeken, ahol többdimenziós hőáramlás, hőáramsűrűségváltozás alakul ki az épületszerkezetekben a

környező szerkezetekhez viszonyítva. Ugyanezen elv szerint azokban az esetben, ahol a nedvességáram sűrűségének (fluxusának) nagysága változik a környezetéhez képest, nedvességhidaknak nevezhetjük. Az építményeken belüli páratartalom és hőmérséklet eloszlásának numerikus szimulációjával könnyedén előre jelezhetjük az adott épületelem életciklusa alatti viselkedését, amely megkönnyítheti többek között az építészeti kulturális örökség fenntartását is. A magyar és külföldi szakirodalomban azonban kis mennyiségű, hiányos és leegyszerűsített forrás áll rendelkezésünkre a régi hagyományos födémek hőtechnikai tulajdonságaival kapcsolatban, illetve sokszor maga az ismeretlen rétegrendi kialakítás is hátráltatja az ellenőrzési lehetőségeket.

A numerikus szimulációs technológiák az építőipari digitalizáció előretörésével nagy fejlődésnek indultak az elmúlt években, így szinte már minden modellezhető és vizsgálható számítógépes technológiákkal. Jelenleg több olyan numerikus szoftver is van a piacon, amelyekkel hatékonyan vizsgálható az épületszerkezetek higrotermikus viselkedése, azonban ez elemzések pontossága nagy mértékben függ a felhasznált matematikai modellek hatékonyságától és a bemenő adatok pontosságától. A dolgozatomban Comsol Multiphysics szoftver segítségével készítettem részletes, végeselemmédszeren alapuló hőtechnikai, valamint kapcsolt hő-és nedvességtranszport (HAM) szimulációkat a Magyarországon leginkább elterjedt hagyományos födém szerkezetek teljesítményének értékelésének céljából.

5. Szakirodalmi áttekintés, alapismeretek

5.1. Vizsgált hagyományos födém szerkezetek bemutatása

A födémek a helyiségek lefedésére, vízszintes térelhatárolásra szolgáló szerkezetek. A födémeknek a térelhatároláson és a rájuk lévő terhek viselésén kívül fontos szerepe még az épületek vízszintes irányú kimerevítése is. Födémek nélkül az épületek vékony falai nem tudnának a szélnyomásnak ellenállni. Lényeges azonkívül az is, hogy a födémek behorgonyzó hatása megakadályozza a több emelet magas falak kihajlását; a födémek révén az ilyen falak kihajlási hossza egy emelet magasságnyira csökken. A különböző anyagú és fajtájú síkfödémeket a rájuk ható terhelések hajlításra veszik igénybe. A födémek falakra vagy kiváltógerendákra támaszkodnak.

A történelmi időkben a födém céljára csak a faanyagú és boltozott szerkezetek álltak rendelkezésre, az emeletek közti födémeket kis magasságú boltozatokkal építették meg. Ezek nagy falvastagságot igényeltek, így nem voltak gazdaságosak. A vasnak és vasbetonnak az épületszerkezetek terén való felhasználása lehetővé tette az alul síkfelületű födémek alkalmazását nagyobb támaszközök esetén is. Ezek előnyös kis szerkezeti magasságuk és kedvezőbb teherátadásuk miatt általánosan használhatóbbá váltak és jóformán teljesen kiszorították a boltozott és faanyagú födémeket.

A födémektől megkívánt követelmények a következők [1]:

- kellő szilárdság/teherbírás
- kellő rugalmasság
- kis szerkezeti magasság
- kis önsúly
- alul-felül sík elhatárolás
- nedvességátvitellel szemben való viselkedés
- jó hőszigetelő képesség
- jó hanggátló/hangszigetelő képesség
- egyszerű és gyors előállíthatóság
- tűzbiztonság
- vezetékek könnyű elhelyezhetősége

- esztétikai szempont
- gazdaságosság

A födémek részei a következők:

1. teherhordó rész (nyers födém)
2. feltöltés:

Hőszigetelő, hanggátló, szintkiegyenlítő szerep, amelynek anyaga fapadlóknál homok, hidegpadlóknál pedig salak. Utóbbi könnyűségénél fogva terhelési, laza halmazsűrűsége és lyukacsossága következtében hőszigetelési és hanggátlási, olcsósága miatt pedig gazdaságossági szempontból jól megfelelő feltöltési anyag. Az olyan födémeknél, ahol nagy feltöltési vastagság adódik, a súly kisebbítése végett még fapadló esetén is salakfeltöltést alkalmaznak és csak a falfelületekkel közvetlenül érintkező részekben készül egy kb. 3-5 cm vastag homok réteg.

3. padló szerkezet:

A padlók súlyviszonyait a lakóházak födémjeinek méretezésekor figyelembe kell venni. Olyan középületeknél azonban, ahol fennáll a későbbi átalakítás lehetősége, a födémeket nehezebb hidegpadló feltételezésével kell megtervezni.

A födémek osztályozása:

- anyaguk szerint:
 - fafödémek
 - szilárd/masszív födémek
- szerkezeti jellegük szerint:
 - gerendafödémek: szorosan egymás mellé elhelyezett, előre elkészített gerendákból állnak
 - gerendás, illetve bordás födémek: egymástól távol álló gerendákból és gerendaközt áthidaló valamilyen szerkezetből állnak
 - lemezszerű födémek
 - nagyméretű elemekből (födémpanelok) álló födémek

A dolgozatban a továbbiakban a Magyarországon leginkább elterjedt födémek közül a Horcsik-, a Bohn-, a Monier-, az E-gerendás, valamint a poroszsüveg födémekkel foglalkozom, amelyek

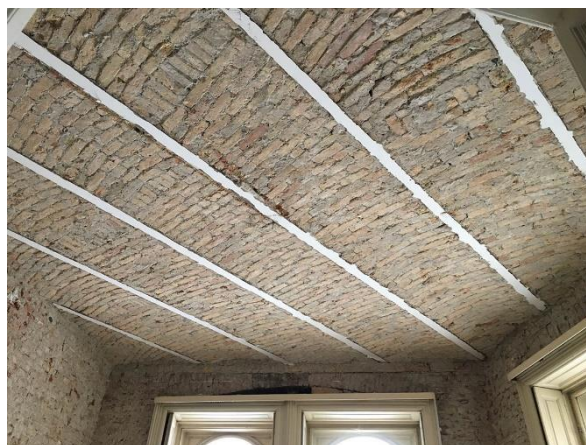
a szilárd anyagú (masszív) födémek közé sorolhatók. Ezen födémek csoportosítása a következő:

- acélgerendás födémek:
 - acélgerendák közti téglaboltozat: **poroszsüveg födém**
 - acélgerendák közti csömöszölt betonboltozat
 - acélgerendák közti vasbeton lemezfödémek:
 - felül-/alulbordás födém: **Monier-födém**
 - acélgerendák közti vasbetétes téglalemez födém: **Horcsik födém**
 - acélgerendák közti pallókból, lapokból és egyéb thb építőlemezekből épített födémek
- vasbeton gerendás födémek
 - egy. vasbeton gerendák: **ÉTI/Weiler gerendák + vasbetétes téglalemez/téglatálcás födém vagy E jelű béléstestek**
- monolit jellegű vasbeton födémek
 - vasbeton lemezfödém
 - alul-/felülbordás lemezfödém
 - kazettás vasbeton födém
 - monolitos gerendák közti vasbetétes téglalemez födém
 - gombafödém
 - sűrűbordás vasbeton födém
 - idomtestes/vastégla födém: **Bohn-födém**
 - födémpanelök

Fontos megemlíteni, hogy nagyban elterjedt földémtípus a Mátrai-födém is, azonban a bonyolult vasalása és geometriai kialakítása miatt jelen dolgozat kereteibe nem fért bele ennek a földémtípusnak a vizsgálata.

5.1.1. *Poroszsüveg földém*

A poroszsüveg földém az acélgerendás földémek típusába tartozik, amely földémek vegyes anyagúak, mégpedig bizonyos távolságban elhelyezett acélgerendákból és a közöket áthidaló valamilyen szerkezetből állnak. Előnyük gyors építhetőségük, aránylagos könnyűségük, az építés időtartamára nem kell alátámasztani őket, esetleg a gerendaközöket áthidaló szerkezeteket a gerendák elhelyezése után is



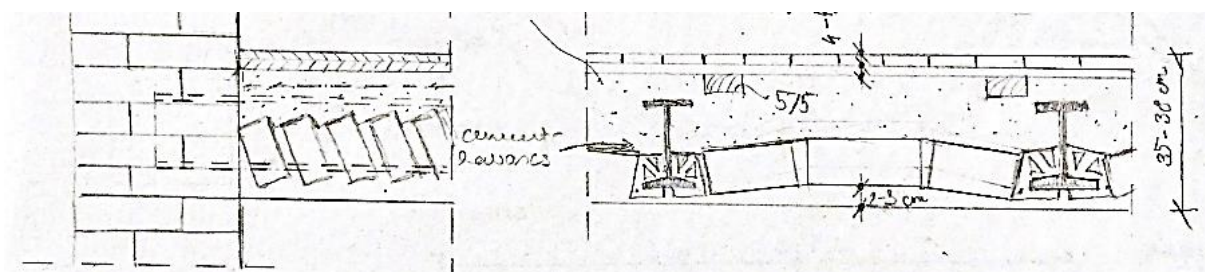
2. ábra: Megépült poroszsüveg földém (fotó: Kvarc Építész Stúdió)

meg lehet építeni. A 19.század második felében már látták, hogy a speciális elemek gyártása nem kifizetődő, tömegigényt csak olcsó falazótéglákkal elégíthetnek ki, így terjedt el a 19. század hatvanas éveitől a poroszsüveg boltozat. E szerkezet lett Közép-Európában 1870-1935 között a legáltalánosabban használt nehéz, tűzálló és-gátló, teherbíró földém. Hazánkban e szerkezet az 1870-1920-as évek között a városi bérházépítés típusszerkezete volt. A 20. század első évtizedétől kezdve azonban fokozatosan szorult háttérbe a gerendás-betételemes szerkezetek mögött, de a második világháború nehéz légoltalmiföldém-igénye ismét életre keltette, majd építése az 1950-es években szűnt meg.

A legtöbbet közepes lakóházi terek felett építették 4,0-6,5 méteres fesztávon. Különbséget szokás tenni a vasgerendás beton vagy vasalt beton földém és a vasgerendás téglaboltozatos földém között, pedig a téglaboltozatos szerkezet is tipikusan hátöntéssel készült. A hátöntés a merevséget fokozta, a téglákat kötötte össze és síkfelületet képezett a további építéshez, a nagyobb terhelés elviselésére szánt szerkezeteket gyakran vasalt hátbetonozással készítették. A földémeket homok vagy salak feltöltéssel építették, annak ellenére, hogy tudták a salak korrodálja az I gerenda kiálló fejét. Viszonylag hamar rájöttek arra is, hogy a vakpadló párnafáit célszerű a vas fejlemezére fektetni, így elkerülhető volt, hogy a vakpadló leszálljon a

fejlemezre, ezzel azonban a feltöltés célja értelmét veszítette. A földem szélső gerendáit falkötővasakkal a falba horgonyozták, földemnyílások mellett a szélső gerendákat szintén hasonló módon horgonyozták ki. A téglaboltozat egyszerűen felülhetett az I gerendára, ahol a szélső elemeket orrtéglaként alakították ki, a színvonalasabb szerkezeteket orrtéglával vagy boltozatindító betontalppal látták el, utóbbi azonban vakolt mennyezeten szürke elszíneződéseket okozott. Több különböző kialakítási módja létezett; építettek egyenes övű poroszsüveg boltozatot, amely azonban a jelentős feszítési igény és bonyolult ékelése miatt nem vált be. Ritkább szerkezetek közé tartozott az emelt poroszsüveg boltozat, amely a gerendázatra helyezett magasztópofákon fekvő, emelt boltmezőkkel készült.

A szerkezet teherbírását maga a gerendázat határozta meg, a közönséges vastartós téglaboltozat általában kisebb gerendákkal és 3,0-6,5 m közötti fesztávokkal épült, a masszív és üreges szerkezetek fesztávolságai 3,0-8,5 m között voltak. A nagyobb fesztávolságok áthidalására segéd tartókat alkalmaztak: monolit vasbeton vagy bádogtartós mestergerendákat építettek be. A vas földemgerendákat a falban kötővassal tolóvasakhoz horgonyozták vagy a falban fekvő falkötővashoz erősítették. Nagyobb szerkezetekben a vasakat átfűzték a falközépig benyúló gerendákon, vastag falban a gerendák néha rájuk szegecselt toldalékokkal csatlakoztak a kötővasakhoz vagy minden 3.-6. nyúlt be a falba a kötővasakig. A 19. század vége felé kialakult, hogy nagy falnyílások esetében a földem vasgerendáit a falban vasgerenda fogta össze. Nagy terhelésű, nagyméretű gerendákat néha rájuk szegecselt pótövekkel láttak el, az egymás mellett fekvő tartókat rájuk szegecselt összefogó lemezekkel/pántokkal rögzítettek egymáshoz, általában 1,0 m körüli kiosztással. A hengerelt gerendák a 19.század végéig inkább öntöttvas oszlopokra, később már hengerelt vasszerkezetekre ültek rá. [2]



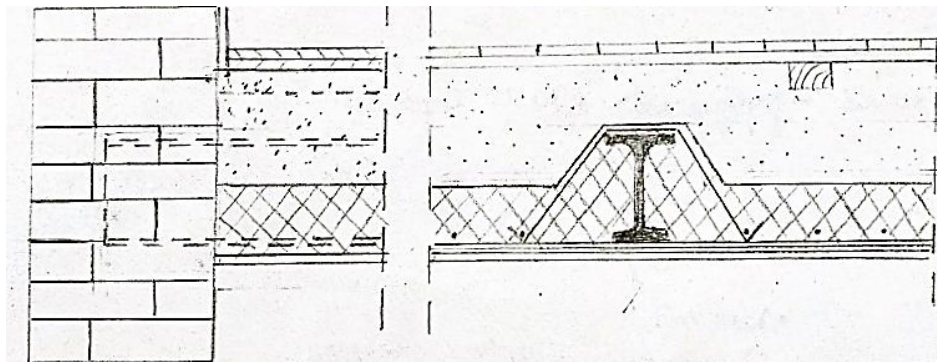
3. ábra: Poroszsüveg földem vázlatos ábrája (saját ábra)

A 20.század elejére kialakult a szerkezet hazai építési gyakorlata, melynek műszaki feltételeit a Magyar Mérnök- és Építész Egylet ajánlása tartalmazza:

- a födémvastagság nem lehet 30 cm-nél kevesebb, de legalább 11 cm-rel magasabb legyen a legnagyobb vasgerenda magasságánál
- a vasgerendákat ólom-míniummal vagy más rozsdavédő mázzal kell ellátni, betonba burkolt gerendákat rozsdavédő mázzal nem szabad bevonni
- a vasgerendák távolsága 140 cm-nél nagyobb ne legyen
- a boltozat ívmagassága rétegenként váltakozva legalább 2,5-3 cm
- a záradék felett legalább 8 cm feltöltés szükséges
- a födém 1:4 keverési arányú portland-cementtel javított fehérmészhabarccsal készüljön
- téglaboltozatból készült szélső mező vasgerendáit 150 cm távolságban 15 mm-es vagy 120 cm-es távolságban 12 mm-es vonórudakkal kell összekötni a határfalon készített koszorúgerendával, vagy határfal mellé helyezett vasgerendával
- vasbeton lemez szélső lemez esetében a lemez legalább 6 cm vastag legyen és a mellé helyezett vasgerenda felső övét teljesen körül fogva, a túlsó oldal orrtéglájához csatlakozzon

5.1.2. *Monier-födém*

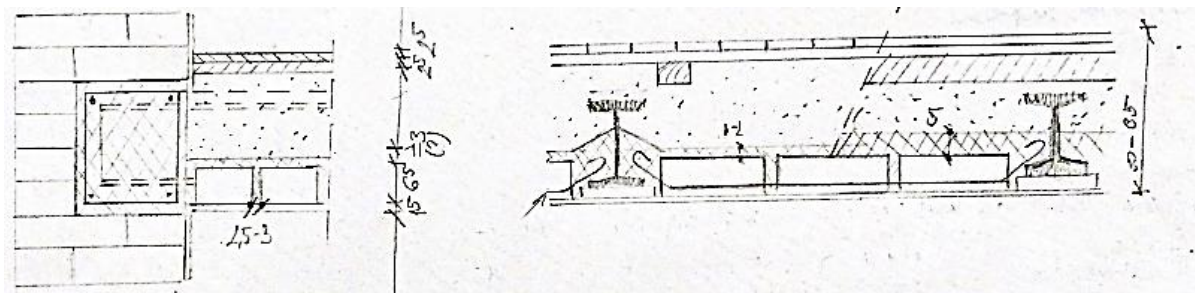
A 19.-20. század fordulója előtt Magyarországon is kezdtek elterjedni a betonból és vasbetonból épülő szerkezetek, így egyre több födém is ezen anyagok felhasználásával készült. 1890 körül a felülbordás, alul sík szerkezetű vasalt beton Monier-födém terjedt el leginkább hazánkban. A födém kialakítása során az acélgerendát bebetonozták, amely korrózióvédelmet biztosított az acélgerendák számára, valamint megakadályozta a keresztmetszetek kibicsaklását is, ezáltal növelve a teherbíró képességet is. Eredetileg a vasalást igyekeztek átfűzni a gerendán, valamint alul átfűzött pótvasalást alkalmaztak a gerenda környéki repedések elkerülése érdekében. A későbbi számítások során a takarékoság érdekében a vasbeton lemez szélességébe beleszámították a pótvasalás felhajlítások közeit is, így a lemezvastagság a legtöbb esetben a minimálisan megengedett 8 cm-re adódott. [3]



4. ábra: Monier-födém vázlatos ábrája (saját ábra)

5.1.3. Horcsik- (Kleine-) fődém

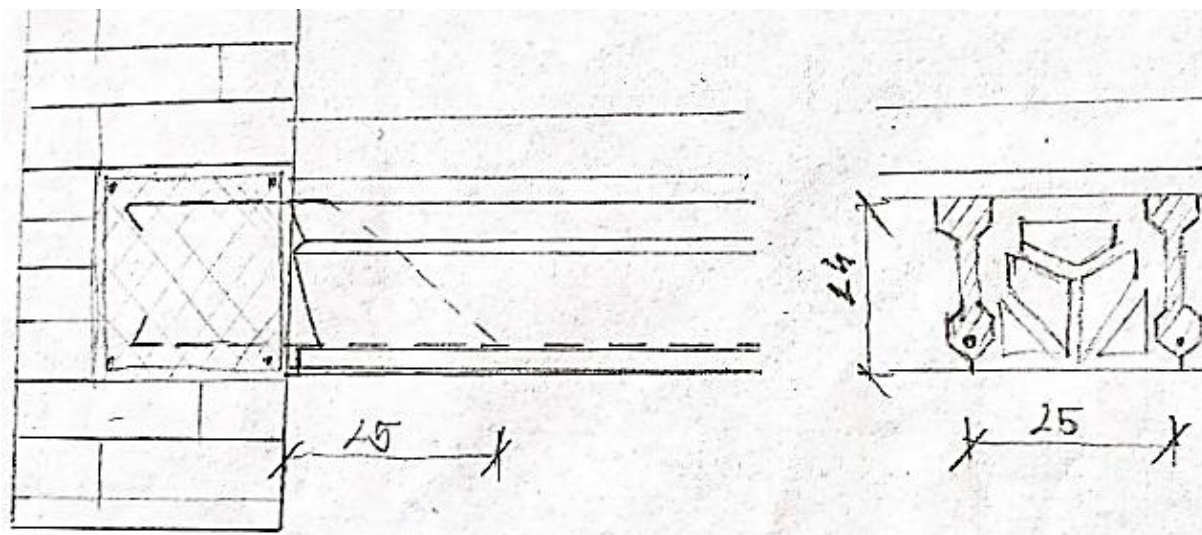
A gazdasági válság okán az építőipart is utolérte a spórolás, így terjedt el a téglabetétes vasbeton lemezes Horcsik-födém, amelynek szabadalmát 1934-ben nyújtották be. Külföldön ez a típusú födém a Kleine-födém nevet viselte, tulajdonképpen a Horcsik-födém lemeze ennek a födémnek az utánzata volt. A födém jóval olcsóbb volt a tömörlemezes megoldásoknál, hiszen kevés betont igényelt és a téglabetéteket bontott téglából is készíthették, népszerűsége egészen a második világháború utánig kitartott, egészen addig, amíg az előregyártott betételemes födémek kerültek előtérbe. A födém kialakítása felülbordás volt, így könnyen megoldhatóvá tette a vezetékeezést, a gerendák távolsága 1,3-1,6 m, a téglabetétek közötti 2,5 cm-es merőleges hézagok portlandcementből készült kibetonozásába vasbetéteket fektettek, a párhuzamos hézagoknak 2 cm szélesnek kellett lenniük. A téglák fölé rábetonozás került, amelyet csak abban az esetben számoltak hozzá a minimum 7 cm-es födémlemez magassághoz, ha a vastagsága 3-5 cm között volt. Ezt a típusú födémeket koszorúval készítették, amely kialakítása során a lemezvastagságnak és szélességnek megfelelő sávot homokkal töltötték ki, majd a födém készítése során behelyezték a szükséges vasalást és kibetonozták. [3]



5. ábra: Horcsik-födém vázlatos ábrája (saját ábra)

5.1.4. Bohn-födém

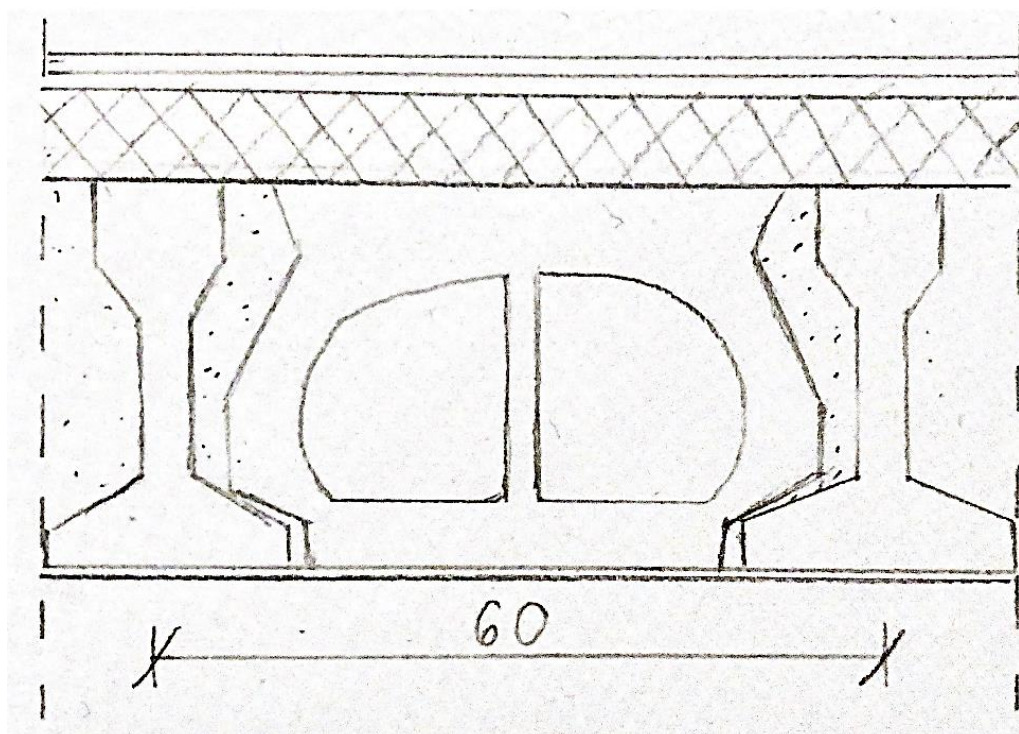
Az üreges téglák elterjedésével a kerámiákat, illetve idomtéglaakat a vasbeton szerkezetek kialakításához is felhasználták. Mésztartalmú anyagból csak vastagabb falvastagságú béléstesteket lehetett gyártani, ezt a hátrányt igyekeztek előnnyé változtatni a vastégla födémek. Ezt oly módon tették, hogy a béléstesteket is bevonták a födém erőjátékába és a béléstest felső részét a nyomófeszültség felvételére alkalmasan alakították ki. Hazánkban a leginkább elterjedt vasbetetes téglafödém a Bohn-födém volt, amelyet 1934-től kezdve gyártottak a békéscsabai, valamint az óbudai téglagyárban, egészen az 1980-as évekig. A födém szerkezet téglamagassága 24 cm, bordatávolsága 25 cm, téglahossza 30 cm volt. A kitörhető oldallapjaival negatív nyomatékok tudott felvenni, kitörhető felső lapjai pedig megkönnyítették a süllyesztett elemek, vezetékek befogadását, valamint csökkentette a feltöltés mértékét. Teherbírása a vasalás kialakításától függött, megfelelő kialakítással alkalmas volt az egyre növekvő födémterhek elviselésére is. Egyik nagy előnye közé tartozott, hogy szabálytalan alakú formák lefedésére is alkalmasnak bizonyult külön alátámasztó vagy kiegészítő szerkezetek használata nélkül is. Az 1960-as évektől kezdve feltöltés nélkül, könnyű felbetonozással és minimális hangcsillapító réteggel készült. [2]



6. ábra: Bohn-födém vázlatos ábrája (saját ábra)

5.1.5. E-gerendás födém

1952-ben kezdtek el előregyártott födémgerendákat gyártani, amelyet az akkori Építéstudományi Intézet (ÉTI) fejlesztett ki. A gyártást kétféle keresztmetszettel indították; a kisebb falközök áthidalására alkalmas F és a nagyobbra G jelűeket. Kezdetben a gerendák közeit féltégla vastag boltozattal vagy téglabetétes vasbeton lemezzel töltötték ki, később megszülettek a BH tálcák és a B100, valamint B60-as béléstestek. Az előregyártott födémek hagyományos rétegrendje a következő volt: szerkezet-feltöltés-burkolat. Amíg a födémfeltöltés anyaga salak volt, addig nem volt igény arra, hogy a födém felül is sík legyen, azonban a kopogó hangokat elnyelő úsztatóréteg elterjedésével már fellépett a felső sík felület igénye is. Ennek hatására kialakult az új igényeknek megfelelő és gazdaságosabb előregyártott gerenda típusa; az E-gerenda. Ezek a gerendák feszítettek kialakításúak, 19 cm magasságúak és 2,40-6,60 m méretű falközök mérethatárai között 60 cm-es lépcsőkben gyártják. Hozzá gyártották az alacsonyabb EB-jelű – EB60/19, EB30/19, EB60/24 – béléstesteket. 1968-1990 között Magyarországon hatalmas népszerűségnek örvendett ez a födém típus, hiszen a legtöbb családi lakóház B30-as falazótéglából, monolit vasbeton koszorúval, E-gerendás födémmel és hagyományos ácsszerkezettel készült. [2]



7. ábra: E-gerendás födém vázlatos ábrája (saját ábra)

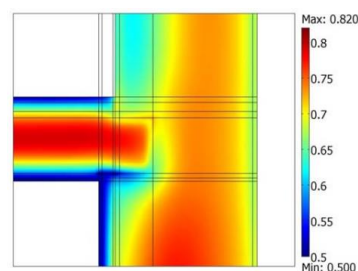
5.2. Kapcsolt hő- és nedvességtranszport modellezés

A 19. század elejére a termodinamika és a hővezetés témaköre került az épületfizika középpontjába. A kapcsolt hő- és nedvességtranszport modellezésével az 1930-as években kezdtek foglalkozni, ekkor jelentek meg az első módszerek, amelyek a páradiffúziót a hőtranszporthoz kapcsolták állandósult állapotban. 1937-ben Teesdale [4] kiadott egy tanulmányt a falakban és padlásokon kialakuló kondenzációról, majd 1958-ban Glaser [5] a publikációjában egy számítási módszertant dolgozott ki falak higrotermikus teljesítményének kiszámítására a kritikus felületi hőmérséklet, páratartalom és páralecsapódás elkerülése érdekében. Azonban ez a számítási módszer eredetileg hűtőházak könnyűszerkezetes falainak a vizsgálatára vonatkozott, és ezért a „normál” térelhatároló szerkezetek közül leginkább a könnyűszerkezetes rétegrendek vizsgálatára alkalmas, melyeknél kicsi a nedvességkapacitás, nem számottevő a kiindulási építési nedvesség és nincs vízfelvétel csapóesőből. Philip és De Vries [6] 1957-ben mutatta be a talajok konjugált hő- és nedvességtranszportjáról szóló munkáját, majd egy évvel később publikálta az általánosított egyenleteket is. Az ötvenes évek végén és a hatvanas évek már léteztek olyan számítógépes szoftverek, amelyek segítségével a modellekben figyelembe lehetett venni a gőzdiffúziót, a kapilláris vízzállítást, a kezdeti nedvességet, a párolgási hőt és a tranziens körülményeket. A probléma ezekkel a modellekkel azonban az volt, hogy feltételezték, hogy a nedvességtranszport felosztható gőz- és folyadékáramra, azonban porózus anyagokban ezek külön nem mérhetők. Később a számítógépes technológiák fejlődése lehetővé tette a két- és háromdimenziós geometriák modellezését is, majd a 2000-es évektől kezdődően már a teljes épületszint modellezésére helyeződhetett a hangsúly. Az elmúlt évtizedekben számos kutatás született a témában, amelyek főleg Rode [7], Künzl [8], Grunewald [9], Hagentoft [10], de Wit [11], Van Schijndel [12], Hens [13] és Dr. Nagy Balázs [14] neveihez fűződnek.

Épületfizika és épületenergetika területén az épületek és épületrészek hőtechnikai modellezése már rég óta széles körben használatos. Azonban a hőhidakért legnagyobb részben felelős épületszerkezeti csatlakozások higrotermikus elemzésével már jóval kevesebb publikáció foglalkozik [14]. Azt is meg kell említeni, hogy ugyan jelen kutatásban higrotermikus vizsgálatok alatt csak kapcsolt hő- és nedvességtranszporttal foglalkoztunk, azonban kutatásokban számos esetben a „HAM” rövidítés alatt levegőtranszportot is értenek. Mivel ezekben az esetekben különböző légzárósági modelleket használnak [15], így főleg

hőszigeteléssel ellátott vagy könnyű szerkezeteknél a légáteresztő képesség hőhidakra gyakorolt hatása jelentős lehet, ellenben légzáró falazott szerkezetek esetében a légáteresztésnek nincs jelentős hatása a hőátbocsátási tényezőre [16]. Az elmúlt évek kutatásai alapján akár azt is mondhatnánk, hogy az épületelemek és a sík épületszerkezetek [17], mint tömör falazott falak [18], előregyártott panelek [19], szigetelt falazott vagy beton [20], könnyűbeton falak [21], könnyű favázas falak [22] vagy különböző burkolati szerkezetek [23] higrotermikus szimulációi egyre nagyobb körben elterjedtek, azonban épületszerkezetek csatlakozásai és a hőhidak modellezése még gyerekcipőben jár. A többdimenziós szimulációk készítésének a lehetősége a Fraunhofer Intézet által fejlesztett WUFI 2D bemutatásával kezdődött a 2000-es években. 2011-ben bemutatták validált, egész épületre kiterjedő szimulációs szoftverüket, majd 2013-ban pedig ennek összekapcsolási lehetőségeit a többdimenziós hőhídszimulációval.

A hagyományos épületszerkezetek rekonstrukciója során kitüntetett szerepet kap a felhasznált anyagok higrotermikus viselkedésének megfelelő ismerete, amelyhez az elmúlt években egyre több alkalommal használtak numerikus szimulációkat.[24]–[26] A modellezésbe bevont állapotfüggvények azonban jellemzően nem szabványosítottak és túlzottan parametrizáltak, emiatt voltak,



**8. ábra: Nedvességáram eloszlás
ábra fa földem-fal csatlakozás
esetében [29]**

akik próbálkoztak kompaktabb, kevesebb paraméterszámmal rendelkező függvények kidolgozásával.[26] Találhatunk még néhány kutatást, amelyekben Comsol Multiphysics-et használtak többdimenziós numerikus szimulációk készítéséhez [12][27], illetve néhányan foglalkoztak fal-födém csatlakozások (8. ábra) [28], [29] és nyílászáró beépítések [30] két- és háromdimenziós szimulációjával, hogy megvizsgálják a különböző anyagtulajdonságok hatását, azonban jóformán több szakirodalom nem köthető ehhez a témához. Ez többek között azért is problémás, mert épületszerkezetek higrotermikus viselkedése jóval kedvezőtlenebb lehet, amennyiben a számítások során a kapcsolt hő-és nedvességtranszportot is figyelembe vesszük a hőtechnikai számítások mellett. Dr. Nagy Balázs ásványgyapottal hőszigetelt kerámia falazóblokkok esetében megvizsgálta [31], hogy milyen eredmények adódnak a hőátbocsátási tényezőre abban az esetben, ha csak hőtechnikai szimulációt végzett el, illetve amikor figyelembe vette a kapcsolt hő-és nedvességtranszportot is a számítások során. Az

eredményei azt mutatták, hogy akár 30%-os eltérés is adódhat a hőátbocsátási tényezők katalógus értékei és a HAM-szimulációk eredményei közt. Ez az eredmény is alátámasztja a hőtechnikai szimulációk mellett a higrotermikus elemzés fontosságát.

5.2.1. Méretezési szabványok

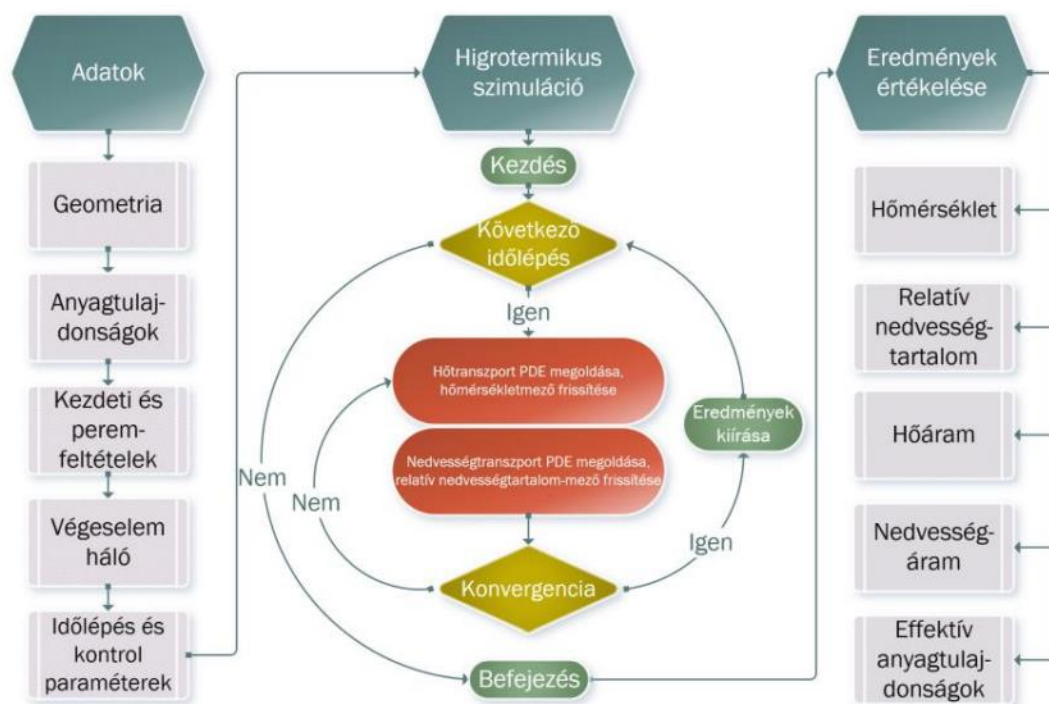
A szerkezeten belüli nedvességviszonyok megfelelőségénél azt kell megvizsgálni, hogy a nedvességforrás és nedvességtranszport folyamatok eredményeképpen nem alakulnak e tönkremenetelhez vezető állapotok a szerkezetek belsejében. A szerkezetek nedvességtechnikai ellenőrzéséről jelenleg az MSZ EN 24140 [32] rendelkezik, amely alapvetően Glaser módszertanát [5] használja, amely egy feltételezett állandósult állapotban a szerkezeten keresztüli páradiffúzió hatására az egyes szerkezeti rétegek eltérő páradiffúziós és hővezetési ellenállása miatt esetlegesen kondenzálódó nedvességtartalom nagyságát, valamint egy feltételezett kiszáradási időszakban a leadható nedvesség nagyságát vizsgálja egy grafikai módszerrel. Azonban a módszertannal számolt eredmények sok esetben félrevezetőek, amely az alábbi főbb hiányosságainak köszönhetőek:

- elhanyagolja a kapilláris nedvességvezetést
- elhanyagolja a nedvességgel szállított hőt, a nedvességfelvétel és az elpárologtatás hatását a szerkezetek energiamérlegére
- elhanyagolja az anyagjellemzők hőmérséklet és nedvességtartalom függését
- elhanyagolja a pontos nedvességkapacitást

Az MSZ EN 24140 [32] szerinti számítás történhet az MSZ EN ISO 13788 [33] vagy az MSZ 24140 [32] szabvány szerint, illetve bizonyos esetekben a Glaser-módszernél pontosabb számítási módszertanok alapján, mint például többdimenziós vízgőzáramok számításánál, valamint ha a szerkezetben a telítési vízgőzpárányomásnál nagyobb vízgőznyomás keletkezik, akkor a számítást az MSZ EN 15026 [34] alapján kell elvégezni. Ez a szabvány a dinamikus kapcsolt hő-és nedvességtranszport modellezésnek elméletét és számításait foglalja össze, amely során a kibővített anyagtulajdonságoknak köszönhetően a Glaser-módszerhez képest sokkal pontosabb eredményeket kaphatunk. A kutatás során az MSZ EN 15026 [34] szabvány szerinti HAM szimulációkat végeztem, amely sokkal pontosabb fizikai modellekre épül.

6. Modellezés és szimuláció

A higrotermikus numerikus modellezéshez COMSOL Multiphysics 5.6 [35] végeselemes szoftvert alkalmaztam. A modellezés során a matematikai egyenletek az energia és nedvesség-megmaradás törvényén alapulnak. A modellezés közben egyszerűsítéseket kellett alkalmazni: a geometria állandó, nincs hőmérséklet vagy nedvességtartalom-változás miatti alakváltozás; nincs változás az anyagtulajdonságokban állagromlás vagy öregedés miatt; a hőmérséklet vagy nedvesség miatt nem zajlanak le kémiai reakciók; a szorpciós látens hő egyenlő a kondenzáció vagy a párolgás látens hőjével; nincs hiszterézis a nedvességtárolási képességben, melynek elhanyagolt a hőmérsékletfüggése; végezetül pedig a páradiffúzió és a folyadéktranszport csak az anyagok relatív nedvességtartalmától függ. A szimulációkban a háromdimenziós geometriai modelleket használtam, az anyagtulajdonságok szabványokon alapulnak. Az anyagtulajdonságok laboratóriumi méréseken és szabványokon alapulnak, a peremfeltételeket a vonatkozó szabványok alapján állítottam be az állandósult állapotbéli szimulációkban. A dolgozatban a higrotermikus szimulációt Dr. Nagy Balázs doktori értekezésében [14] ismertett állandósult állapotra vonatkozó módszertan alapján végeztem, amelynek folyamatábrája a következő 9. ábrán látható:



9. ábra: Higrotermikus szimuláció vázlatos folyamatábrája [14]

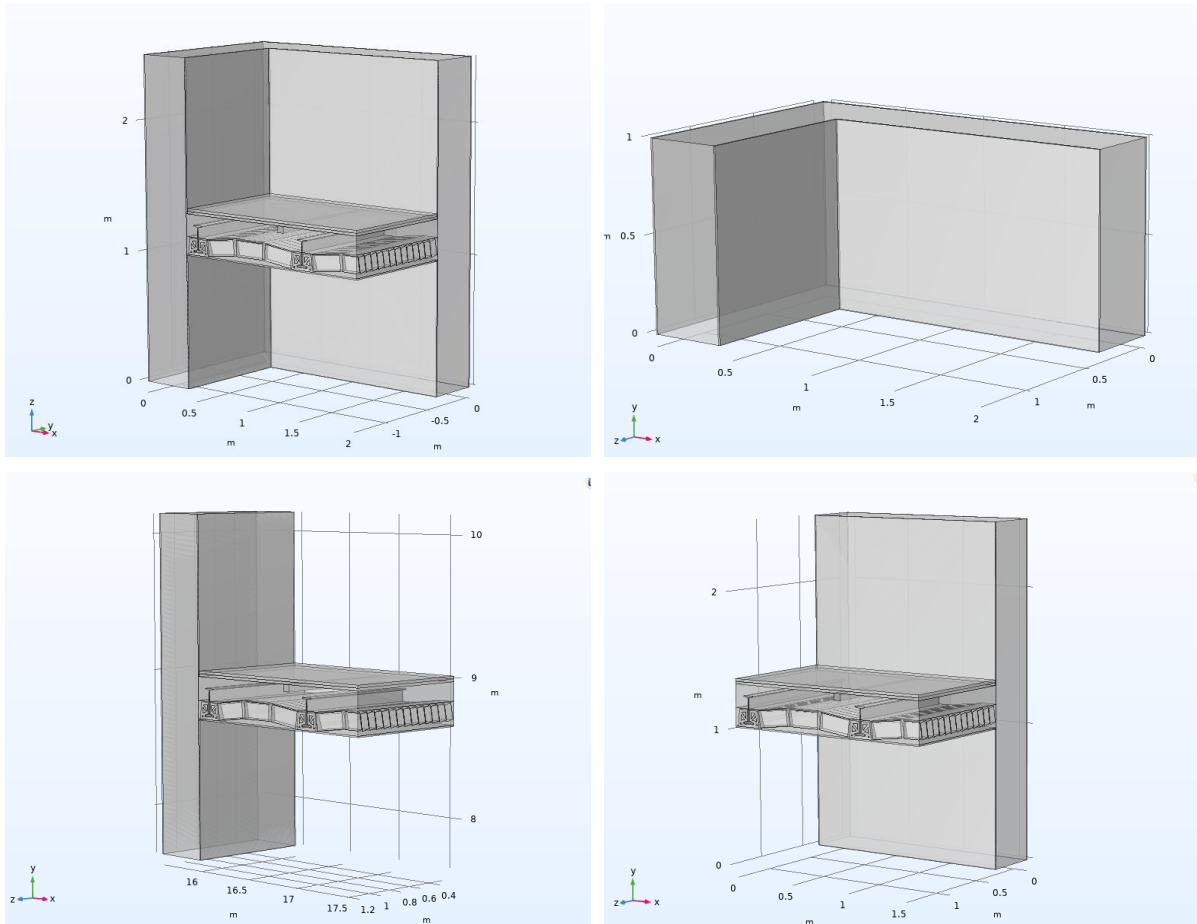
6.1. Födémek modellezése

A numerikus szimuláció megkezdéséhez első lépésben fel kellett építeni a geometriai modelleket. Ugyan erre Comsol Multiphysics-ben is van lehetőség, de nehezen kezelhető felület. A födémek modelljeit ezért AutoCAD 2023-ban készítettem, a geometriát szilárdtestként vettem fel, így a kimentett dwg formátumot a Comsol Multiphysics egyéb átalakítások nélkül is meg tudja nyitni. A számítási kapacitás végeessége miatt, azonban egyszerűsítésekre volt szükség a geometria kialakítása során. Dr. Nagy Balázs és Paulik Emese egy korábbi kutatásukban [36] megvizsgálták, hogy födémlemezek vasalásának numerikus szimulációja esetén mekkora eltérést okoz az eredmények közt, ha a betonacélt nem hengerként, hanem 8-szög alapú hasábként modellezzük és arra jutottak, hogy az eltérés kevesebb, mint 1%, viszont mind a hálófelbontás, mind a futtatási idő drasztikusan csökkent. Emiatt a szilárdtestek kialakításánál kör helyett, 8-szögeként határoztam meg a betonvas keresztmetszetét, valamint mellőztem az ívek használatát. A vasalást csak a poroszsüveg- és a Bohn-födém esetében modelleztem külön, vasalt födémlemez és a koszorú esetében a bonyolult és sok esetben bizonytalan geometriai kialakítások miatt a vasalást magasabb beton hővezetési tényező felvételével vettem figyelembe. Jelen kutatás kereteiben továbbá elhanyagolásra kerültek a különböző gerendák rögzítésére szolgáló gerendakapcsok és vonóvasak. Összesen 20 db különböző geometriai modell készült, födémenként 4 db, amelyekre azért volt szükség, hogy meg tudjam határozni a falfelületek és a csatlakozások hőveszteségeit külön-külön. A következő geometriai modellek készültek födémenként:

- 2-irányú fal-födém sarok csatlakozás
- fal-födém csatlakozás a teherhordási irányra merőlegesen
- fal-födém csatlakozás a teherhordási iránnyal párhuzamosan
- falsarok kialakítás

Mivel a vizsgált födém típusok mindegyike gerendás födém, amelyek jellemzője, hogy azonos traktusok ismétlődéséből épülnek fel, így mindegyik esetben 1,5 traktust modelleztem le, amely 2 gerendát és 1,5 födémmezőt fed le, ezek szélessége minden esetben meghaladja a minimális 1 méter szélességet. Függőleges irányban fél-fél szintmagasságot vettem figyelembe, így 2,5 méter magas modelleket készítettem. A teherhordásra merőleges/párhuzamos fal-födém csatlakozások esetében mindig csak az aktuális irányban vettem figyelembe a falcsatlakozást

az MSZ EN ISO 10211:2017 [37] szerinti legalább 1 m hosszan. Falsarok kialakításánál pedig a falakat 1 méter magasságban a födémek nélkül modelleztem. A poroszsüveg födém geometriai kialakítása következő 10. számú ábrán látható:



10. ábra: Poroszsüveg födém különböző kialakítású geometriai modelljei

6.1.1. Rétegrendi kialakítások

A modellezés során a hőtechnikailag nem releváns rétegeket elhanyagoltam, így az alábbi rétegrendi kialakításokat vettem figyelembe:

- **poroszsüveg-födém**
 - 1-3 cm vakolat ívmagasság függvényében
 - I km. vasgerendák, közöttük poroszsüveg téglaboltozat habarcskitöltéssel
 - salakfeltöltés ívmagasság függvényében
 - 2 rtg. szalagparketta vakgerendázatra fektetve
- **Monier-födém**

- 1 cm vakolat
- I km. vasgerendák, közöttük 10 cm vastag beton födémlemez felülbordás kialakítással
- 15 cm salakfeltöltés
- 2 rtg. szalagparketta vakgerendázatra fektetve
- **Horcsik-födém**
 - 1 cm vakolat
 - I km. vasgerendák, közöttük 6,5 cm magas falazótéglából álló födémtálca 2 cm vastag habarcskitöltéssel
 - 16 cm salakfeltöltés
 - 2 rtg. szalagparketta vakgerendázatra fektetve
- **Bohn-födém**
 - 1 cm vakolat
 - 24 cm Bohn-tégla
 - 4 cm felbeton
 - 2 rtg. szalagparketta vakgerendázatra fektetve
- **E-gerendás födém**
 - 1 cm vakolat
 - 19 cm E-jelű gerenda, közte B60/19-jelű béléstartók
 - 4 cm felbeton
 - 2 rtg. szalagparketta vakgerendázatra fektetve

6.1.2. Fal rétegrendi kialakítása

A modellezés során mindegyik födém típus esetében 40 cm vastag kézi falazóelemekből falazott, habarcskitöltéssel készült falat vettem figyelembe, melynek a rétegrendi kialakítása a következő:

- 1 cm külső vakolat
- 40 cm kézi falazótéglából készült falazat vízszintes és függőleges habarcskitöltéssel
- 1 cm belső vakolat

6.1.3. *Felújítási opciók rétegrendi kialakításai*

A felújítás célja a födémek állagvédelmi megfeleltetése, valamint a hőveszteségek csökkentése. Ezek alapján először az alábbi 5 rétegrendi kialakításra végeztem el a higrotermikus szimulációkat:

1. 5 cm Multipor belső oldali hőszigetelés 1 cm Multipor Adhesive vakolattal a belső oldalon
2. 1-1 cm SAKRET Premium WDP 055 hőszigetelő vakolat külső, illetve belső oldalon
3. 2-2 cm SAKRET Premium WDP 055 hőszigetelő vakolat külső, illetve belső oldalon
4. 3-3 cm SAKRET Premium WDP 055 hőszigetelő vakolat külső, illetve belső oldalon
5. 5 cm Multipor hőszigetelés belső oldalon 1 cm Multipor Adhesive vakolattal a belső oldalon, illetve 1 cm SAKRET Premium WDP 055 hőszigetelő vakolat külső oldalon

A fent ismertetett rétegrendi kialakítások esetében kapott saját léptékben mért hőmérsékletek egyike sem érte el a 0,7-es állagvédelmi minimumkövetelményt Bohn-födém esetében, így erre a födém típusra az eredmények ismeretében egy 6. felújítási opciót is megvizsgáltam:

6. 5 cm Multipor hőszigetelés belső oldalon 2 cm Multipor Adhesive vakolattal a belső oldalon, illetve 2 cm SAKRET Premium WDP 055 hőszigetelő vakolat külső oldalon

6.2. **Anyagtulajdonságok**

A higrotermikus elemzéssel a hőmérséklet és a nedvességtartalom függvényében változó anyagtulajdonságokat is figyelembe vehetők, így az anyagok valós termikus viselkedése is jobban közelíthető. Emiatt a teljes kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimulációk elvégzéséhez lényegesen több bemeneti paraméter ismeretére van szükség, mint egyszerű hőtechnikai szimulációk esetében. A HAM szimulációkhoz az anyagok hővezetési tényezőjén és páradiffúzió ellenállásán kívül szükség van a sűrűség, a fajhő, a szorpciós izoterma és a folyadéktranszport tényező, illetve adott esetben ezek hőmérséklet és nedvességtartalom szerinti változásának ismeretére. A vizsgálat során alkalmazott anyagtulajdonságok, mint a λ_i hővezetési tényező, f_T hőmérséklet-átszámítási együttható, f_ψ nedvesség-átszámítási együttható és μ páradiffúziós ellenállási szám (70%-os nedvességtartalomig érvényes) az MSZ EN ISO 10456 [38] alapján lettek felvéve. A relatív páratartalomtól függő nedvességtárolási képességet (lásd 8., 9., 10., és 11. ábra), vízfelvételi képességet, nedvességgel szembeni

ellenállást minden esetben a WUFI 6 szoftver adatbázisa [39] alapján lett meghatározva. A hőtechnikai szimulációk során az anyagok effektív hővezetési tényezője szabvány szerinti konstans értékkel lettek felvéve, míg a HAM szimulációk során kétváltozós függvényként szerepelnek, amelyeket az MSZ EN ISO 10456 [38] alapján határoztam meg:

$$\lambda_2 = \lambda_1 * F_T * F_m$$

ahol:

- λ_1 : első környezeti állapot hővezetési tényezője $[\frac{W}{mK}]$
- λ_2 : második környezeti állapot hővezetési tényezője $[\frac{W}{mK}]$
- F_T : hőmérséklet – átszámítási együttható $[\frac{1}{K}]$
- F_m : nedvesség – átszámítási együttható $[\frac{m^3}{m^3}]$

(1)

$$F_T = e^{f_T(T_2-T_1)}$$

(2)

ahol:

- f_t : hőmérséklet – átszámítási együttható
- T_1 : az első környezeti állapot hőmérséklete $[K]$
- T_2 : a második környezeti állapot hőmérséklete $[K]$

$$F_m = e^{f_u(u_2-u_1)}$$

(3)

ahol:

- f_u : nedvesség – átszámítási együttható
- u_1 : az első környezeti állapot szerinti nedvességtartalom $[\frac{m^3}{m^3}]$
- u_2 : az első környezeti állapot szerinti nedvességtartalom $[\frac{m^3}{m^3}]$

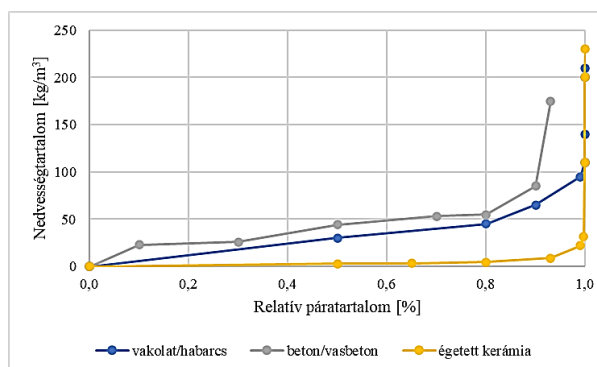
6.2.1. Történeti szerkezetek anyagtulajdonságai

Az eredeti földémszerkezetek egyes anyagaihoz tartozó anyagtulajdonságokat a következő 1. számú táblázat tartalmazza:

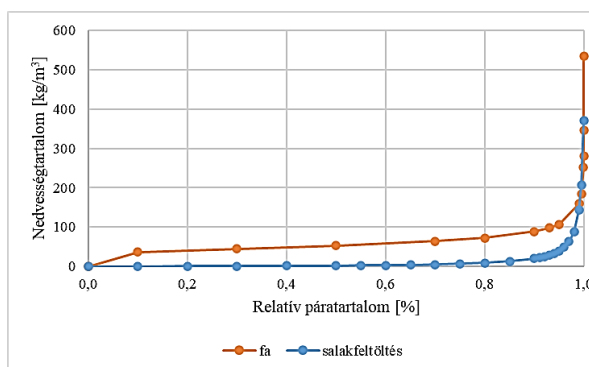
anyagtulajdonságok	hővezetési tényező λ_1 [W/mK]	hőmérséklet-átzámitási együttható f_T [1/K]	nedvesség-átzámitási együttható f_Ψ [m ³ /m ³]	páradiffúziós ellenállási szám μ [1]	folyadéktranszport-tényező 80%-os nedvességtartalomnál $D_{w80\%}$ [m ² /s]	folyadéktranszport-tényező 100%-os nedvességtartalomnál $D_{w100\%}$ [m ² /s]
vakolat	0,80	0,001	4	10	1,09E-10	2,49E-08
égetett kerámia	0,80	0,001	10	10	3,00E-05	7,57E-08
beton	2,00	0,001	4	100	1,84E-08	2,00E-07
vasbeton	2,50	0,001	4	130	1,84E-08	2,00E-07
fa	0,18	1,400	80	5	4,00E-12	5,00E-12
salakfeltöltés	0,45	0,001	4	10	7,46E-09	7,00E-05
habarcs	0,80	0,001	4	10	1,09E-10	2,49E-08
betonvas	50,00	-	-	1000	-	-
levegő $d=1,3$ cm	0,81	-	-	1	-	-
levegő $d=2$ cm	0,13	-	-	1	-	-
levegő $d=6$ cm	0,36	-	-	1	-	-
levegő $d=1,15$ cm	0,07	-	-	1	-	-

1. táblázat: Szimulációhoz szükséges anyagtulajdonságok

Az anyagok WUFI 6 adatbázisa alapján meghatározott nedvességtároló képességét a következő 11. és 12. ábrák mutatják:



11. ábra: Vakolat, habarcs, beton, vasbeton és égetett kerámia nedvességtároló képessége



12. ábra: Fa és salakfeltöltés nedvességtároló képessége

6.2.2. Felújított szerkezetek anyagtulajdonságai

– belső oldali hőszigetelés

Belső oldali hőszigetelésként Xella Multipor hőszigetelő lapokat alkalmaztam. A Multipor hőszigetelő lapokkal történő belső oldali hőszigetelés megoldást nyújt a szerkezet hőszigetelő képességének javítására ott, ahol a határoló szerkezet hőszigetelése a külső oldalon nem valósítható meg. Ilyen esetek például a műemléki homlokzatok (az eredeti homlokzat megtartása miatt), beépítési korlátok, társasházak homlokzatai (tulajdonjogi problémák miatt). A Multipor hőszigetelő lapok alacsony páradiffúziós ellenállása és kapilláris szerkezete biztosítja, hogy a belső oldali hőszigetelés párazáró réteg nélkül kerüljön kialakításra. Az

anyagszerkezet a fűtött tér páratartalmát képes felvenni, majd azzal egyidejűleg a kapilláris szerkezetnek köszönhetően azt visszavezetni a belső tér felé (kiszáradás). [44] A belső oldalon ásványi hőszigetelő lapokkal történő belső oldali hőszigetelés készítéséhez kifejlesztett nagy rugalmasságú Multipor páraáteresztő ásványi ragasztót és ágyazó habarcsot alkalmaztam 1, esetenként 2 cm vastagságban.



13. ábra: Xella Multipor hőszigetelő rendszer [43]

– *hőszigetelő vakolat*

A hőszigetelő vakolat egy olyan vakolathabarcs, amely alacsony hővezető képességgel rendelkezik. Az előírások szerint a hővezető képességnek $\lambda < 0,2 \text{ W/mK}$ -nek kell lennie, de a gyakorlatban a hőszigetelő vakolatok a 0,2-es értéknél általában jóval alacsonyabbak. Az alacsony hővezető képesség úgy érhető el, ha az anyag porozitása magas, és a vakolat száraz térfogatsűrűsége pedig igen alacsony, ez esetben 600 kg/m^3 alatti. Ezt különböző adalékanyagok hozzáadásával lehet megoldani. Leggyakrabban EPS polisztirolgolyókat adnak a hőszigetelő vakolathoz, ugyanakkor ez nem túl környezetkímélő megoldás. Ilyen szempontból jobb megoldás valamilyen ásványi alapú adalékanyag, legfőképp a duzzasztott perlit használata. A hőszigetelő vakolatok további fontos tulajdonsága, hogy képesek rendkívül szorosan rátapadni a homlokzatra, így nem tud semmilyen légrés keletkezni a falazat és a

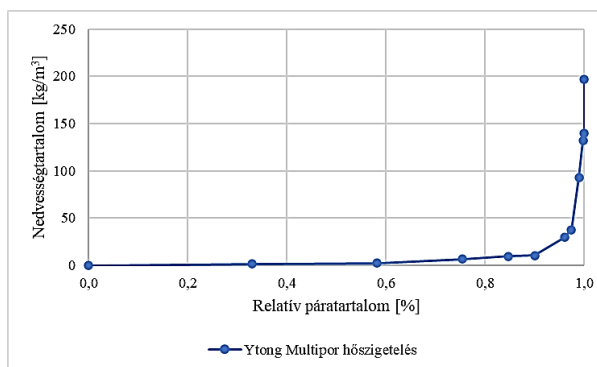
vakolat között. A vakolatrendszer áll egy alapvakolatból, illetve szükséges egy víztaszító záróvakolat réteg is, amely az időjárási hatásokkal szembeni védelmet biztosítja, és az épület megjelenését meghatározza. Hőszigetelő vakolatként SAKRET Premium WDP 055 égésálló, bármilyen ásványi aljzatra felhelyezhető hőszigetelő vakolatot alkalmaztam 1-3 cm vastagságban kívül és belül egyaránt. [45]

A felújítás során alkalmazott anyagok higrotermikus szimulációhoz szükséges tulajdonságait a következő 2. számú táblázat tartalmazza:

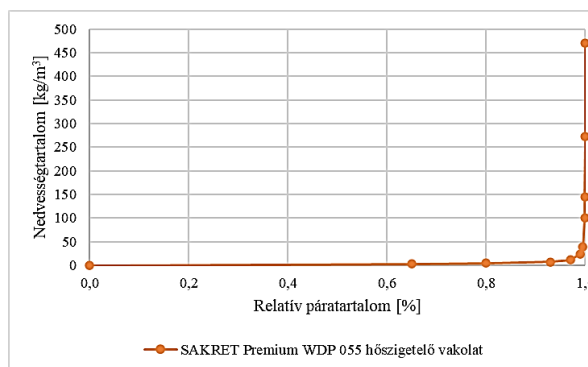
anyagtulajdonságok	hővezetési tényező λ_i [W/mK]	hőmérséklet- átszámítási együttható f_T [1/K]	nedvesség- átszámítási együttható f_W [m ³ /m ³]	páradiffúziós ellenállási szám μ [1]	folyadéktranszport- tényező 80%-os nedvességtartalomnál $D_{w80\%}$ [m ² /s]	folyadéktranszport- tényező 100%-os nedvességtartalomnál $D_{w100\%}$ [m ² /s]
Ytong Multipor hőszigetelés	0,045	0,003	10	3	8,18E-09	1,65E-08
SAKRET Premium WDP 055 hőszigetelő vakolat	0,05	0,001	4	10	2,00E-12	2,60E-05
Ytong Multipor Adhesive vakolat	0,155	0,001	4	10	1,24E-10	1,79E-08

2. táblázat: Felújításkor alkalmazott anyagok higrotermikus szimulációjához szükséges anyagtulajdonságai

Az anyagok WUFI 6 adatbázisa alapján meghatározott nedvességtároló képességét a következő 69. és 70. ábrák mutatják:



14. ábra: Belső oldali hőszigetelés nedvességtároló képessége



15. ábra: Hőszigetelő vakolat nedvességtároló képessége

6.3. Numerikus számítási módszer, fizika

A dolgozat keretein belül Comsol Multiphysics 5.6 szoftver segítségével végeztem állandósult állapotban kapcsolt hő- és nedvességtanszport szimulációt, amely során a legújabb prEN 15026:2022 [40] szabványt vettem figyelembe. Az állandósult állapot egyenletei időtől függetlenek és nem veszik figyelembe az anyagok hő- és nedvesség kapacitását, azonban a hővezetési tényező korrigálásra kerül a nedvességtároló képesség és a hőmérséklet alapján, valamint a futtatási idejük jelentősen rövidül a szimulációk során.

6.3.1. Hőtranszport

A hőtranszportra vonatkozó parciális differenciálegyenlet első tagja hővezetésből adódó hőáramokat, a második tagja az evaporációból adódó hőáramokat veszi figyelembe. Amennyiben csak hőtechnikai szimuláció készül, úgy csak az első tagot kell figyelembe venni, alakja a következő:

$$\nabla q = \nabla [\lambda_{eff} \nabla T + L_v \delta_p \nabla (\varphi p_{sat}(T))] = 0 \quad (4)$$

ahol:

- $\nabla = (\frac{\delta}{\delta x}, \frac{\delta}{\delta y}, \frac{\delta}{\delta z})$: *nabla vektoriális differenciáloperátor*
- q : *hőáramsűrűség* [$\frac{W}{m^2}$]
- Q : *hőforrás* [$\frac{W}{m^3}$]
- $\lambda_{eff} = \lambda_{10,dry} \cdot e^{f^T(T_2-10^\circ C)} \cdot e^{f_\psi(u_2)}$: *effektív hővezetési tényező* [$\frac{W}{mK}$] [38]
- T : *abszolút hőmérséklet* [K]
- L_v : *fázisváltás látens hője* [$\frac{J}{kg}$]
- $\delta_p = \frac{\delta_a}{\mu}$: *páradiffúziós/páravezetési tényező* [$\frac{kg}{mSPa}$]
- μ : *páradiffúziós ellenállási szám* [1]
- φ : *relatív nedvességtartalom* [1]

- ρ_{sat} : telítési párányomás [Pa]

A (4) egyenlet csak hőtechnikai modellezés és szilárd testek esetében a következőképpen alakul [41]:

$$\nabla * q = Q = 0 \quad (5)$$

$$q = -\lambda_{eff} * \nabla * T \quad (6)$$

A hőtranszport peremfeltételeire vonatkozó egyenletek az prEN 15026:2022 [40] értelmében a következők:

- külső peremfeltétel:

$$q_o - n * q = \alpha * (T_{ext} - T) \quad (7)$$

$$T_{ext} = -5^{\circ}C$$

$$\alpha = \frac{1}{R_{se}} = 17 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

ahol:

- q_o : konvektív hőáramsűrűség $\left[\frac{W}{m^2} \right]$
- $-n * q$: a felületre normális befele mutató hőáramsűrűség
- α : hőátadási tényező $\left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$
- T_{ext} : külső hőmérséklet [K]
- T : felület hőmérséklete [K]

- belső peremfeltétel:

$$-n * q = \alpha * (T_{int} - T) \quad (8)$$

$$T_{int} = 20^{\circ}C$$

$$\alpha = \frac{1}{R_{si}} = 8 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

ahol:

- q_0 : konvektív hőáramsűrűség $[\frac{W}{m^2}]$
- $-n * q$: a felületre normális befele mutató hőáramsűrűség
- α : hőátadási tényező $[\frac{W}{m^2 * K}]$
- T_{int} : belső hőmérséklet $[K]$
- T : felület hőmérséklete $[K]$

A hőtechnikai szimulációk során a metszősíkok adiabatikusak, látens hőáramok nincsenek a modellben.

6.3.2. Nedvességtranszport

A nedvességtranszportra vonatkozó parciális differenciálegyenlet első tagja a nedvesség áramok folyadéktranszportjára, míg második tagja nedvesség áramok páratranszportjára vonatkozik és alakja szilárd testek esetében a következő:

$$\nabla g = \nabla [\xi D_w \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_{sat}(T))] = G = 0 \quad (9)$$

ahol:

- $\nabla = (\frac{\delta}{\delta x}, \frac{\delta}{\delta y}, \frac{\delta}{\delta z})$: nabla vektoriális differenciáloperátor
- g : nedvességáram sűrűség $[\frac{kg}{m^2 s}]$
- G : nedvességforrás $[\frac{kg}{m^3 s}]$
- $\xi = \frac{\delta w}{\delta \varphi} [\frac{kg}{m^3}]$: differenciális nedvesség kapacitás
- D_w : diffúziós/folyadéktranszport tényező $[\frac{m^2}{s}]$

A nedvességtranszport peremfeltételeinek meghatározásakor lehetőség van helyi időjárás adatok alkalmazására, így jelen dolgozatban az értékeket nem az MSZ EN 24140 [32], hanem

Dr. Nagy Balázs kutatása [31] alapján határoztam meg, amelyek egy Budapesti, átlagos januári időjárást vesznek figyelembe. A peremfeltételek a következők:

– külső peremfeltétel:

$$-n \cdot g = d_z [\beta_e (\varphi_e \cdot p_{sat}(T_e) - \varphi_{se} \cdot p_{sat}(T_{se}))] \quad (10)$$

$$\varphi_e = 0,73$$

$$T_e = 0,9^\circ C$$

ahol:

- $\beta_e = \frac{\delta_a}{s_{d,se}}$: külső felületek nedvességtranszport együtthatója $[\frac{kgK}{WsPa}]$
- $s_{d,se} = \frac{1}{67+90 \cdot v} [\frac{s}{m}]$
- φ_e, φ_{se} : külső levegő és felületek relatív nedvességtartalma [1]
- T_e, T_{se} : külső levegő és felületek hőmérséklete [K]

– belső peremfeltétel:

$$-n \cdot g = d_z [\beta_i (\varphi_i \cdot p_{sat}(T_i) - \varphi_{si} \cdot p_{sat}(T_{si}))] \quad (11)$$

$$\varphi_e = 0,41$$

$$T_e = 20^\circ C$$

ahol:

- $\beta_i = \frac{\delta_a}{s_{d,si}}$: felületek nedvességtranszport együtthatója $[\frac{kgK}{WsPa}]$
- φ_i, φ_{si} : belső levegő és felületek relatív nedvességtartalma [1]
- T_i, T_{si} : belső levegő és felületek hőmérséklete [K]

7. Szimulációk kiértékelésének módszertana

Mind a hőtechnikai szimulációk, mind a hígtermikus szimulációk segítségével meghatároztam a modellek belső felületeinek hőveszteségét és minimum hőmérsékletét. A kapcsolt hő- és nedvességtranszport szimulációkban a geometriai modellek és az anyagtulajdonságok megegyeznek a korábbiakban használtakkal, de a szimulációkban figyelembe vannak véve a látens hőáramok és az anyagok nedvességgel szembeni viselkedése, így ezektől a szimulációktól pontosabb eredmények várhatók. A hőveszteségek alapján meghatározható, hogy 1 K hőmérsékletkülönbség hatására mekkora hőáram alakul ki 1 m²-nyi felületen. A belső felület minimum hőmérsékletéből számítható a csomópont saját léptékben mért hőmérséklete, amely állagmegóvási problémák kezeléséhez hasznos tényező. A számítások során az MSZ EN ISO 10211:2017 [37] szerinti számítási módszertant alkalmaztam. Első lépésben a történeti szerkezetekre futtatam le a numerikus szimulációkat, amely eredményeket felhasználva meghatároztam minden fűdém típusra a többlet hőveszteségeket, a saját léptékben mért hőmérsékleteket, majd összehasonlítottam a különböző anyagok szimulációból kapott hővezetési tényezőit a tervezési értékekkel. Felhasználva ezeket az eredményeket kidolgoztam a felújítási opciókat és megvizsgáltam, hogy állagvédelmi szempontból milyen rétegrendek kialakítása az optimális egyes fűdém típusokra, ehhez a vizsgálathoz újabb szimulációkat futtattam, amelyek eredményei a 9. fejezetben kerülnek bemutatásra.

7.1. Többlet hőveszteség meghatározása

A numerikus szimulációk segítségével meghatározott csomóponti többlet hőveszteségek meghatározásához első lépésben meg kell határozni a 3 dimenziós szimulációból kapott L_{3D} csomóponti hőátbocsátási tényezőt:

$$L_{3D} = \frac{Q_{3D}}{\Delta T} \quad (12)$$

ahol:

- L_{3D} : 3D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező [$\frac{W}{K}$]
- Q_{3D} : 3D szimulációval meghatározott teljes felületi hőáram [W]
- ΔT : külső és belső hőmérsékletek különbsége [K]

Következő lépésben a teherhordási iránnyal párhuzamos és merőleges irányban lévő fal-födém csatlakozások és a falsarok 2 dimenziós szimulációjából kapott L_{2D} csomóponti hőátbocsátási tényezőit kell meghatározni:

$$L_{2D} = \frac{Q_{2D}}{l_j * \Delta T} \quad (13)$$

- L_{2D} : 2D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező [$\frac{W}{mK}$]
- Q_{2D} : 2D szimulációval meghatározott teljes felületi hőáram [W]
- ΔT : külső és belső hőmérsékletek különbsége [K]
- l_j : csatlakozási hossz [m]

A teherhordási iránnyal párhuzamos és merőleges irányban lévő fal-födém csatlakozások, valamint a falsarok Ψ vonalmenti hőátbocsátási tényezőjének meghatározásához szükség van a fal U korrigálatlan hőátbocsátási tényezőjének kiszámítására, valamint a geometriai modellekből le kell kérni a megfelelő csatlakozási hosszakat:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_i} U_j * l_j \quad (14)$$

ahol:

- Ψ : vonalmenti hőátbocsátási tényező [$\frac{W}{mK}$]
- L_{2D} : 2D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező [$\frac{W}{K}$]
- Q_{2D} : 2D szimulációval meghatározott teljes felületi hőáram [W]
- U_j : a két vizsgált teret elválasztó j 1D épületelem hőátbocsátási tényezője [$\frac{W}{m^2K}$]
- l_j : az a hossz, amelyen U_j érvényes [m]

A csomópontra számolt 3 dimenziós hőátbocsátási tényezőjéből kivonva a falfelületekre fajlagosított hőátbocsátási tényezőt, valamint a csatlakozási hosszakra vonatkoztatott vonalmenti hőátbocsátási tényezőket megkapjuk, hogy mekkora az adott szerkezeti kialakítás χ többlet hővesztesége:

$$\chi = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} U_i * A_i - \sum_{j=1}^{N_i} \Psi_j * l_j \quad (15)$$

ahol:

- L_{3D} : 3D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező [$\frac{W}{K}$]
- U_i : a két vizsgált teret elválasztó i 1D épületelem hőátbocsátási tényezője [$\frac{W}{m^2K}$]
- A_i : az a felület, amelyen az U_i érték érvényes
- Ψ_j : vonalmenti hőátbocsátási tényező [$\frac{W}{mK}$]
- l_j : az a hossz, amelyen Ψ_j érvényes [m]

7.2. Saját léptékben mért hőmérséklet

A nem megfelelően kialakított szerkezeti részletek esetében, megfelelő hőmérséklet és nedvességtartalom viszonyok esetében penészesedési probléma állhat elő a belső felületeken. Ennek ellenőrzésére szolgál az f_{Rsi} saját léptékben mért hőmérséklet, amely a DIN 4108-2 [42] értelmében, ha 0,7-nél kisebb értéket eredményez, akkor állagvédelmi szempontból nem megfelelő épületszerkezeti kialakításról beszélhetünk és fennáll a penészesedés lehetősége. Hazánkban szigorúbb értelmezés alapján ez az érték 0,8 is lehet, amely értelmezés főleg tapasztalaton és az MSZ EN 24140 [32] 17. oldalán található C3. ábrán alapul. A numerikus szimulációkból lekért minimum belső felületi hőmérséklet alapján az alábbi módon számítható a csomóponti kialakítás saját léptékben mért hőmérséklete:

$$f_{Rsi} = \frac{T_{s,min} - T_e}{T_i - T_e} [1] \quad (16)$$

ahol:

- f_{Rsi} : saját léptékben mért hőmérséklet [1]
- $T_{s,min}$: belső felületen mért minimum hőmérséklet [K]
- T_e : a külső levegő hőmérséklete [K]
- T_i : a belső levegő hőmérséklete [K]

7.3. Anyagok hővezetési tényezőjének változása

A hővezetési tényező azt fejezi ki, hogy mekkora hőáram halad át időegység alatt egységnyi vastagságú, az áramlásra merőlegesen egységnyi felülettel bíró anyagon, egységnyi hőmérsékletkülönbség hatására. Az eredményeket felhasználva megvizsgáltam, hogy higrotermikus szimulációk során mennyivel térnek el az anyagok hővezetési tényezői a hőtechnikai szimulációk során használt gyártói katalógusok, valamint adatbázisok alapján felvett hővezetési tényezőktől. Míg a hőtechnikai szimulációk során az egyes anyagok hővezetési tényezőjét konstans értéként adtam meg bemenő paraméterként, addig a higrotermikus szimulációk során a 6.2 fejezetben kifejtett módon az anyagok hővezetési tényezője többváltozós függvényként került meghatározásra az MSZ EN ISO 10456 [38] alapján az alábbi módon:

$$\lambda_2 = \lambda_1 * F_T * F_m \quad (1)$$

ahol:

- λ_1 : első környezeti állapot hővezetési tényezője $[\frac{W}{mK}]$
- λ_2 : második környezeti állapot hővezetési tényezője $[\frac{W}{mK}]$
- F_T : hőmérséklet – átszámítási együttható $[\frac{1}{K}]$
- F_m : nedvesség – átszámítási együttható $[\frac{m^3}{m^3}]$

A higrotermikus szimulációk során ezen kívül még lekértem minden anyagra a vonatkozó nedvességtartalmat és átlagos hőmérsékletet is, hogy ezen értékeket is fel tudjam használni az eredmények kiértékelésénél és értelmezésénél. A kiértékelés során az acélt nem szerepeltettem a táblázatokban, ugyanis nem nedvességérzékeny anyag, így a higrotermikus szimulációk során sem tér el a hővezetési tényezője a hőtechnikai szimulációk során figyelembe vett értéktől.

8. Történeti fűdészerkezetek eredményei

Az eredmények kiértékelése során első lépésben a szimulációk eredményeit, valamint a geometriai modellek paramétereit felhasználva meghatároztam a többlet hőveszteséget, majd lekértem a minimum belső felületi hőmérsékletet, amelyek alapján kiszámoltam a saját léptékben mért hőmérsékleteket. Végül lekértem a numerikus szimulációkból az egye anyagokra vonatkozó hővezetési tényezőket és összehasonlítottam a tervezési értékekkel. A számításokhoz szükséges geometriai modellekből lekért hosszakat és felületeket a dolgozat melléklete tartalmazza.

8.1. Hőtechnikai szimulációk eredményei

A hőtechnikai szimulációk eredményei alapján meghatározott többlet hőveszteségek és saját léptékben mért hőmérsékletek számításához szükséges adatokat a 3. táblázat tartalmazza:

modell	hőveszteségek hőtechnikai szimulációból				U_{fi} [W/m ² K]	ΔT [K]	$T_{s,min}$ [°C]
	Q_{teljes} [W]	$Q_{merőleges}$ [W]	$Q_{párhuzamos}$ [W]	Q_{fi} [W]			
poroszsűveg fűdém	242,850	144,390	85,428	98,413	1,439	25	9,92
Monier-fűdém	288,880	187,790	89,956	116,060	1,439	25	10,65
Horcsik-fűdém	281,060	165,720	90,531	106,610	1,439	25	5,79
Bohn-fűdém	198,850	92,313	92,112	95,821	1,439	25	12,98
E-gerendás fűdém	200,820	90,747	95,008	78,199	1,439	25	9,37

3. táblázat: Hőtechnikai szimulációkból kapott adatok

A hőtechnikai szimulációból megkapott adatok segítségével a dolgozat 6.3.1 fejezetében ismertett számítási módszertan alapján a 4. táblázatban látható eredmények születtek:

Hőtechnikai szimulációk									
modell	csomóponti 3D hőátbocsátási tényező	csomóponti 2D hőátbocsátási tényező			vonalmonti hőátbocsátási tényező			többlet hőveszt.	saját léptékben mért hőm.
	L_{3D} [W/K]	$L_{2Dpárh}$ [W/mK]	L_{2Dmer} [W/mK]	L_{2Dfal} [W/mK]	$\Psi_{2Dpárh}$ [W/mK]	Ψ_{2Dmer} [W/mK]	Ψ_{2Dfal} [W/mK]	χ [W/K]	f_{Rsi} [°C]
poroszsűveg fűdém	9,714	3,574	3,596	3,937	0,488	0,510	0,265	-0,077	0,597
Monier-fűdém	11,555	3,598	3,601	4,642	0,462	0,465	0,250	0,033	0,626
Horcsik-fűdém	11,242	3,621	3,703	4,264	0,528	0,610	0,265	0,424	0,432
Bohn-fűdém	7,954	3,684	3,693	3,833	0,558	0,566	0,250	0,033	0,719
E-gerendás fűdém	8,033	3,800	3,781	3,128	0,595	0,575	0,250	0,118	0,575

4. táblázat: Hőtechnikai szimulációkból számolt eredmények

8.2. Higrotermikus szimulációk eredményei

A higrotermikus szimulációk eredményei alapján meghatározott többlet hőveszteségek és saját léptékben mért hőmérsékletek számításához szükséges adatokat az 5. táblázat tartalmazza:

modell	hőveszteségek higrotermikus szimulációból				U_{fal} [W/m ² K]	ΔT [K]	$T_{s,min}$ [°C]
	Q_{teljes} [W]	$Q_{merőleges}$ [W]	$Q_{párhuzamos}$ [W]	Q_{fal} [W]			
poroszsüveg födém	190,840	113,400	66,256	76,090	1,451	19,1	13,22
Monier-födém	227,370	145,230	70,250	89,685	1,451	19,1	13,64
Horcsik-födém	218,590	126,950	70,682	82,409	1,451	19,1	12,91
Bohn-födém	160,770	74,087	74,140	74,093	1,451	19,1	12,28
E-gerendás födém	161,580	72,330	75,745	60,510	1,451	19,1	13,25

5. táblázat: Higrotermikus szimulációkból kapott adatok

A higrotermikus szimulációból megkapott adatok segítségével a dolgozat 6.3.2 fejezetében ismertetett számítási módszertan alapján a 6. táblázatban látható eredmények születtek:

Higrotermikus szimulációk									
modell	csomóponti 3D hőátbocsátási tényező	csomóponti 2D hőátbocsátási tényező			vonalmonti hőátbocsátási tényező			többlet hőveszt.	saját léptékben mért hőm.
	L_{3D} [W/K]	$L_{2Dpárh}$ [W/mK]	L_{2Dmer} [W/mK]	L_{2Dfal} [W/mK]	$\Psi_{2Dpárh}$ [W/mK]	Ψ_{2Dmer} [W/mK]	Ψ_{2Dfal} [W/mK]	χ [W/K]	f_{Rsi} [°C]
poroszsüveg födém	9,992	3,629	3,697	3,984	0,515	0,584	0,280	-0,046	0,645
Monier-födém	11,932	3,678	3,705	4,696	0,514	0,541	0,265	0,057	0,667
Horcsik-födém	11,445	3,701	3,836	4,315	0,580	0,593	0,280	0,495	0,629
Bohn-födém	8,417	3,882	3,879	3,879	0,728	0,725	0,265	0,080	0,596
E-gerendás födém	8,460	3,966	3,945	3,168	0,732	0,711	0,265	0,189	0,646

6. táblázat: Higrotermikus szimulációkból számolt eredmények

A szimulációk során az egyes csomóponti kialakításokra anyagonként megkapott átlagos hővezetési tényezőt, átlagos hőmérsékletet és nedvességtartalmat a 7-11. táblázat tartalmazza:

– Poroszsüveg-födém

Poroszsüveg födém									
teljes csomópont					teherhordásra merőleges csomópont				
anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}	anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}
külső vakolat	0,9237	2,3496	37,8480	0,8	külső vakolat	0,9209	2,7034	37,0040	0,8
belső vakolat	0,9117	16,1770	31,1220	0,8	belső vakolat	0,9099	16,4950	30,5570	0,8

fal	0,8255	8,5710	3,2764	0,8	fal	0,8257	9,6272	3,1985	0,8
kerámia	0,8288	18,5210	2,6860	0,8	kerámia	0,8286	18,9790	2,6191	0,8
habarcs	0,9017	18,4130	27,8140	0,8	habarcs	0,8986	18,9150	26,8230	0,8
acél	50	17,0450	0	50	acél	50	18,1050	0	50
feltöltés	0,4573	18,2230	1,9856	0,45	feltöltés	0,4574	18,8580	1,8661	0,45
teherhordással párhuzamos csomópont					falsarok csomópont				
anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}	anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}
külső vakolat	0,9211	2,6811	37,0710	0,8	külső vakolat	0,9238	2,3449	37,8820	0,8
belső vakolat	0,9101	16,4740	30,6080	0,8	belső vakolat	0,9121	16,0990	31,2590	0,8
fal	0,8257	9,5446	3,2093	0,8	fal	0,8256	8,5599	3,2881	0,8
kerámia	0,8284	19,5310	2,5318	0,8					
habarcs	0,8963	19,4820	26,0540	0,8					
acél	50	18,8860	0	50					
feltöltés	0,4575	19,3440	1,7672	0,45					

7. táblázat: Poroszsüveg födém csomópontjaira kapott átlagos hővezetési tényező, nedvességtartalom és hőmérséklet értékek

– Monier-födém

Monier-födém									
teljes csomópont					teherhordásra merőleges csomópont				
anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}	anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}
külső vakolat	0,9233	2,4120	37,7280	0,8	külső vakolat	0,9208	2,7185	36,9750	0,8
belső vakolat	0,9127	16,2780	31,3670	0,8	belső vakolat	0,9097	16,5400	30,4950	0,8
fal	0,8256	8,8082	3,2729	0,8	fal	0,8258	9,6986	3,1975	0,8
beton	2,2534	18,5790	27,6780	2	beton	2,2456	19,0700	26,6860	2
acél	50	17,2500	0	50	acél	50	18,3980	0	50
feltöltés	0,4574	18,6810	1,9196	0,45	feltöltés	0,4575	19,0700	1,8415	0,45
teherhordással párhuzamos csomópont					falsarok csomópont				
anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}	anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}
külső vakolat	0,9161	2,7129	37,1010	0,8	külső vakolat	0,9235	2,3875	37,7820	0,8
belső vakolat	0,9072	16,5620	29,7900	0,8	belső vakolat	0,9119	16,1450	31,1790	0,8
fal	0,8253	9,7008	3,1409	0,8	fal	0,8256	8,6992	3,2783	0,8
beton	2,2368	19,5070	25,5920	2					
acél	50,0000	18,8850	0,0000	50					
feltöltés	0,5030	19,6070	1,8638	0,45					

8. táblázat: Monier-födém csomópontjaira kapott átlagos hővezetési tényező, nedvességtartalom és hőmérséklet értékek

– Horcsik-födém

Horcsik-födém									
teljes csomópont					teherhordásra merőleges csomópont				
anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}	anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}
külső vakolat	0,9229	2,4557	37,6040	0,8	külső vakolat	0,9203	2,7833	36,8250	0,8
belső vakolat	0,9117	16,1900	31,1210	0,8	belső vakolat	0,9100	16,4970	30,5860	0,8
fal	0,8255	8,6175	3,2698	0,8	fal	0,8257	9,5668	3,2039	0,8
kerámia	0,8288	18,6270	2,6752	0,8	kerámia	0,8286	18,9780	2,6202	0,8
vasbeton	2,9164	38,1660	11,3610	2,5	vasbeton	2,3121	12,4360	35,6450	2,5
habarcs	0,9011	17,9520	27,7570	0,8	habarcs	0,8973	18,8280	26,4730	0,8
feltöltés	0,4574	17,9720	2,0904	0,45	feltöltés	0,4574	18,7080	1,9214	0,45
acél	50	16,4440	0	50	acél	50	17,9740	0	50
teherhordással párhuzamos csomópont					falsarok csomópont				
anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}	anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}
külső vakolat	0,9222	2,6032	37,3760	0,8	külső vakolat	0,9236	2,3661	37,8320	0,8
belső vakolat	0,9134	15,8680	31,6560	0,8	belső vakolat	0,9120	16,1230	31,2180	0,8
fal	0,8257	8,9843	3,2685	0,8	fal	0,8256	8,6300	3,2832	0,8
kerámia	0,8338	10,7580	4,0591	0,8					
vasbeton	2,9932	8,6881	45,3420	2,5					
habarcs	0,9452	10,6790	41,5250	0,8					
feltöltés	0,4620	10,7510	6,4069	0,45					
acél	50	10,5850	0	50					

9. táblázat: Horcsik-födém csomópontjaira kapott átlagos hővezetési tényező, nedvességtartalom és hőmérséklet értékek

– Bohn-födém

Bohn-födém									
teljes csomópont					teherhordásra merőleges csomópont				
anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}	anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}
külső vakolat	0,9234	2,3645	37,7630	0,8	külső vakolat	0,9198	2,8043	36,6810	0,8
belső vakolat	0,9121	16,0690	31,2650	0,8	belső vakolat	0,9096	16,5020	30,4720	0,8
fal	0,8253	8,3329	3,2763	0,8	fal	0,8255	2,8321	3,1778	0,8
kerámia	0,8297	17,6700	2,8748	0,8	kerámia	0,8291	18,8160	2,6847	0,8
beton	2,2743	17,2000	35,2420	2	beton	2,2539	18,0930	27,8540	2
vasbeton	2,8825	11,3740	35,2420	2,5	vasbeton	2,8269	13,3430	29,8860	2,5

acél	50	17,4920	0	50	acél	50	12,6980	0	50
teherhordással párhuzamos csomópont					falsarok csomópont				
anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}	anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}
külső vakolat	0,9200	2,8057	36,7360	0,8	külső vakolat	0,9239	2,3376	37,8990	0,8
belső vakolat	0,9098	16,4970	30,5390	0,8	belső vakolat	0,9122	16,0910	31,2730	0,8
fal	0,8256	9,6237	3,1917	0,8	fal	0,8256	8,5355	3,2898	0,8
kerámia	0,8288	18,8410	2,6521	0,8					
beton	2,2455	19,0850	26,6710	2					
vasbeton	2,8554	13,1040	32,4570	2,5					
acél	50	19,3430	0	50					

10. táblázat: Bohn-födém csomópontjaira kapott átlagos hővezetési tényező, nedvességtartalom és hőmérséklet értékek

– E-gerendás födém

E-gerendás födém									
teljes csomópont					teherhordásra merőleges csomópont				
anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}	anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}
külső vakolat	0,9232	2,3910	37,7030	0,8	külső vakolat	0,9196	2,8368	36,6190	0,8
belső vakolat	0,9119	16,1010	31,2030	0,8	belső vakolat	0,9094	16,5330	30,4190	0,8
fal	0,8253	8,3941	3,2723	0,8	fal	0,8256	9,6959	3,1760	0,8
beton	2,2816	17,0870	31,1530	2	beton	2,2503	18,8340	27,2700	2
vasbeton	2,8648	13,9030	33,0690	2,5	vasbeton	2,8200	16,4400	28,4990	2,5
béléstest	1,7638	17,8200	30,3500	1,5	béléstest	1,7444	18,8640	27,3170	1,5
teherhordással párhuzamos csomópont					falsarok csomópont				
anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}	anyag	λ_{avg}	T_{avg}	WC_{avg}	λ_{terv}
külső vakolat	0,9197	2,8470	36,6390	0,8	külső vakolat	0,9243	2,2779	38,0380	0,8
belső vakolat	0,9095	16,5460	30,4390	0,8	belső vakolat	0,9125	16,0200	31,3990	0,8
fal	0,8257	9,7213	3,1845	0,8	fal	0,8255	8,3305	3,3040	0,8
beton	2,2548	18,2540	27,9100	2					
vasbeton	2,8290	16,3380	29,3220	2,5					
béléstest	1,7426	18,9580	27,0370	1,5					

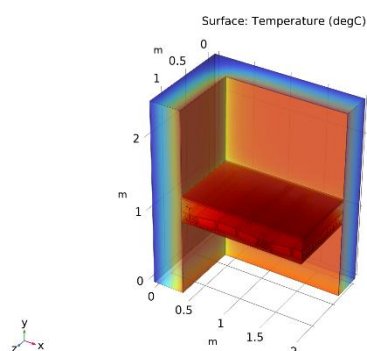
11. táblázat: E-gerendás födém csomópontjaira kapott átlagos hővezetési tényező, nedvességtartalom és hőmérséklet értékek

8.3. Eredmények vizualizálása

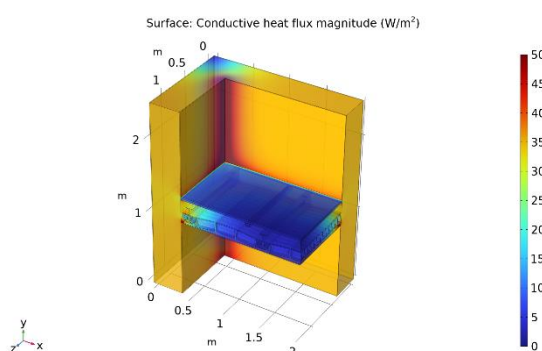
Comsol Multiphysics 5.6 szoftverben végzett numerikus szimulációk során az eredmények vizualizálására is lehetőség nyílik. A hőtechnikai szimulációk során minden fődémtípusra lekértem a fal-födém csatlakozás csomópontok hőmérsékleteloszlás és hőáramsűrűség ábráit, míg higrotermikus szimulációk során ezeken kívül lekértem a relatív nedvességtartalom és a nedvességáram sűrűség ábrákat. Jelen dolgozat keretein belül a terjedelmi korlátok miatt csak az 5 teljes fal-födém modell kicsinyített ábrái kerülnek bemutatásra. A teljes felbontású modellek, valamint a teherhordási irányra párhuzamos és merőleges fal-födém csatlakozások és a falsarok csomópontjainak ábrái a dolgozat mellékleteihez csatolva találhatók.

– poroszsüveg fődém:

A poroszsüveg fődém hőtechnikai szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást és hőáram sűrűséget mutató eredményábrák a 13. és 14. ábrákon kerülnek bemutatásra:

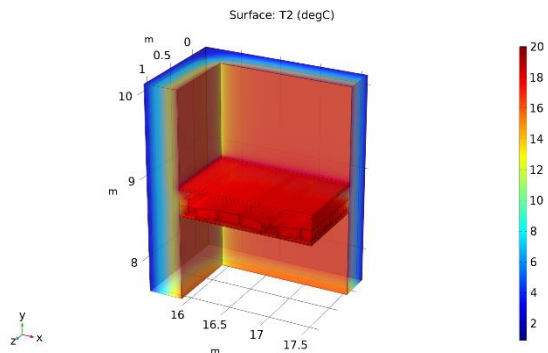


16. ábra: Poroszsüveg fődém hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

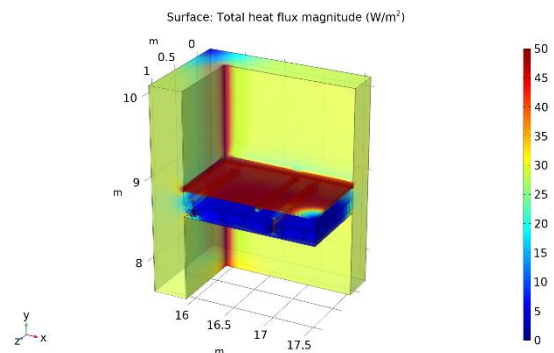


17. ábra: Poroszsüveg fődém hőáram sűrűség ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

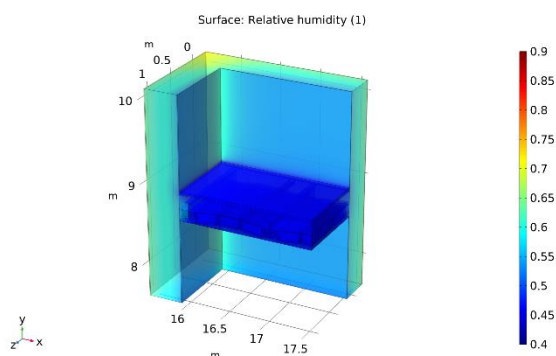
A poroszsüveg fődém higrotermikus szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást, hőáram sűrűséget, relatív nedvességtartalmat és nedvességáram sűrűséget mutató eredményábrák a 15.-18. ábrákon kerülnek bemutatásra:



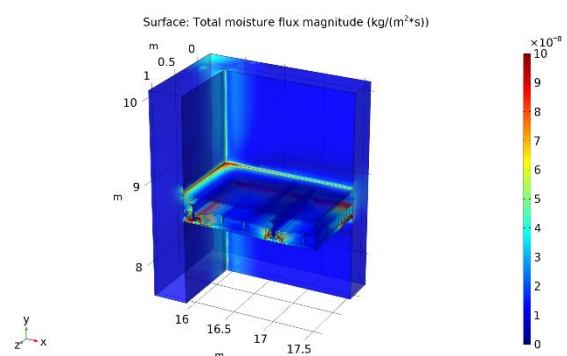
18. ábra: Poroszsüveg földem hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimuláció esetén



19. ábra: Poroszsüveg földem hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimuláció esetén



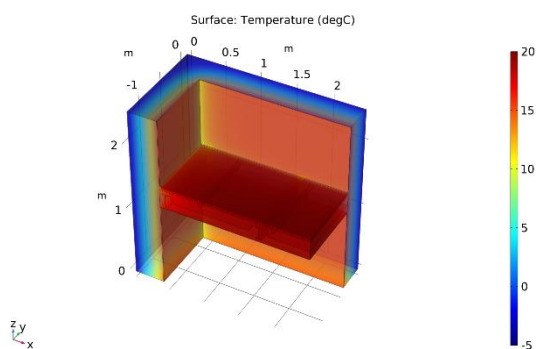
20. ábra: Poroszsüveg földem relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimuláció esetén



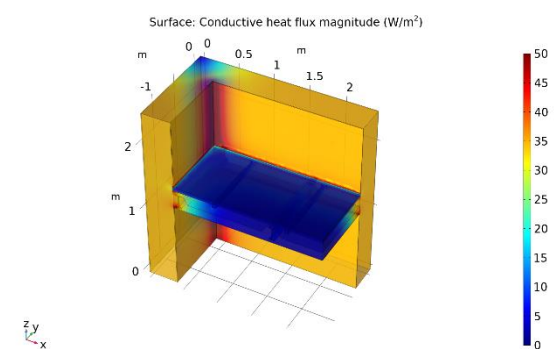
21. ábra: Poroszsüveg földem nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimuláció esetén

– *Monier-födém:*

A Monier-födém hőtechnikai szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást és hőáram sűrűséget mutató eredményábrák a 19. és 20. ábrákon kerülnek bemutatásra:

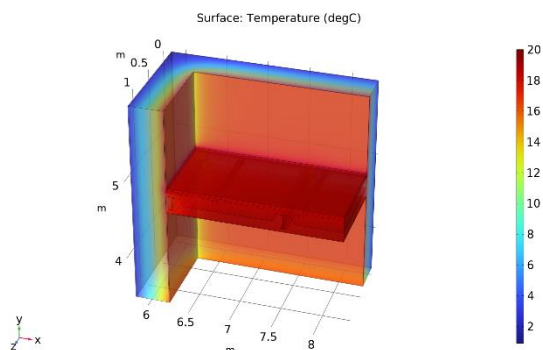


22. ábra: Monier-födém hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

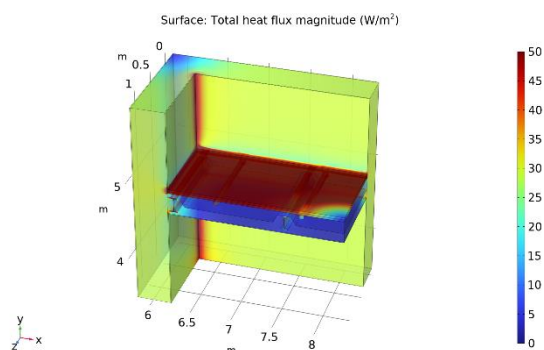


23. ábra: Monier-födém hőáram sűrűség ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

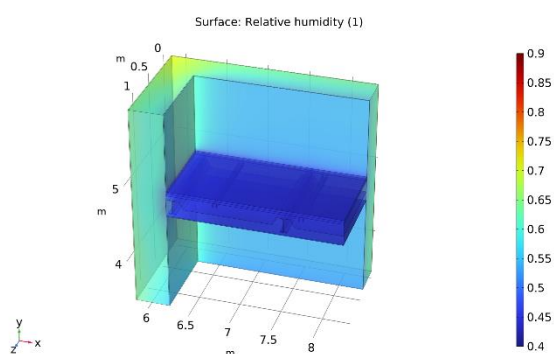
A Monier-födém higrotermikus szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást, hőáram sűrűséget, relatív nedvességtartalmat és nedvességáram sűrűséget mutató eredményábrák a 21.-24. ábrákon kerülnek bemutatásra:



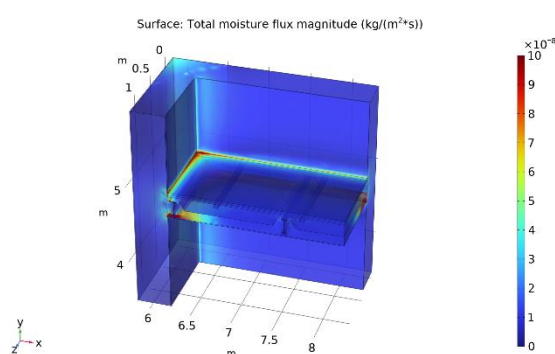
24. ábra: Monier-födém hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimuláció esetén



25. ábra: Monier-födém hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimuláció esetén



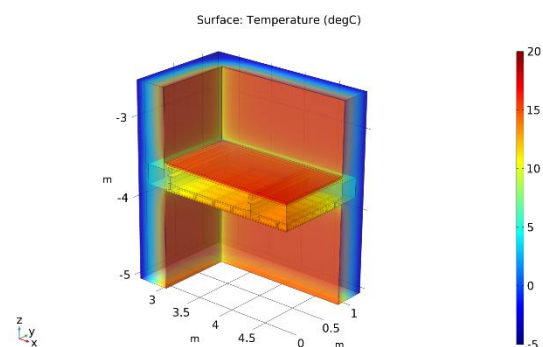
26. ábra: Monier-födém relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimuláció esetén



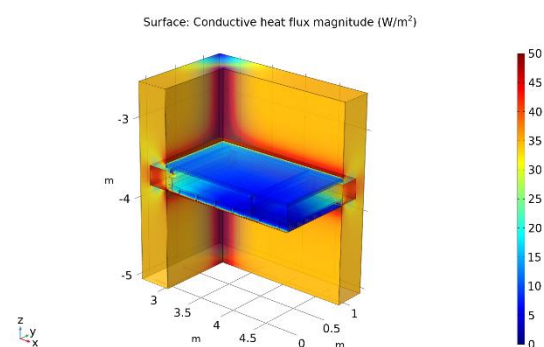
27. ábra: Monier-födém nedvességáram eloszlás ábrája higrotermikus szimuláció esetén

– *Horcsik-födém:*

A Horcsik-födém hőtechnikai szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást és hőáram sűrűséget mutató eredményábrák a 28. és 29. ábrán kerülnek bemutatásra:

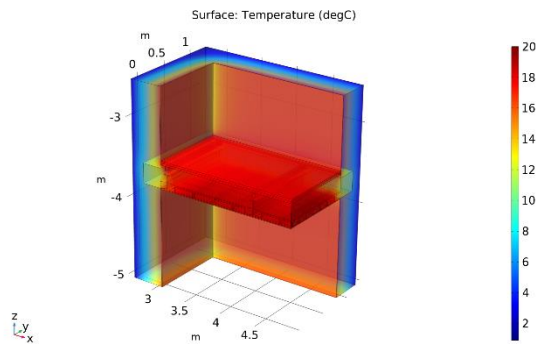


28. ábra: Horcsik-födém hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

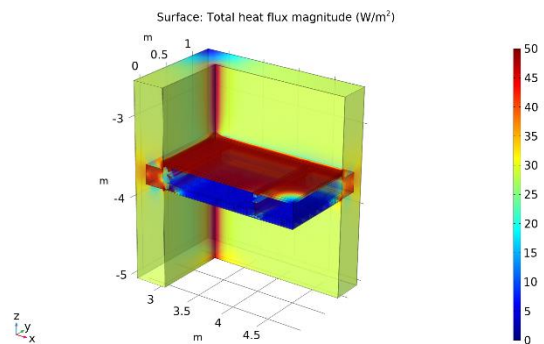


29. ábra: Horcsik-födém hőáram sűrűség ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

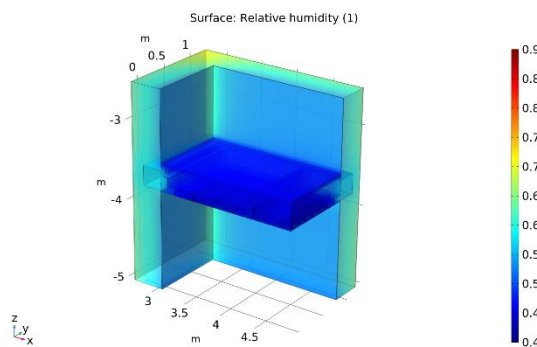
A Monier-födém higrotermikus szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást, hőáram sűrűséget, relatív nedvességtartalmat és nedvességáram sűrűséget mutató eredményábrák a 27.-29. ábrákon kerülnek bemutatásra:



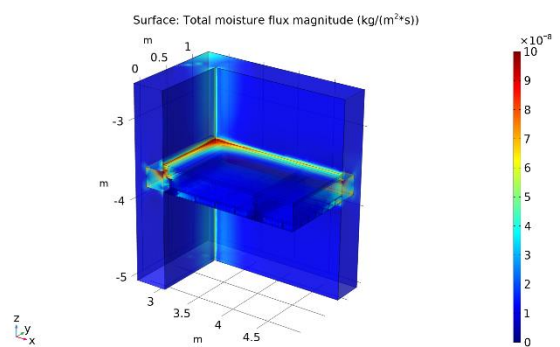
30. ábra: Horcsik-födém hőmérséklet eloszlás ábrája higrtermikus szimuláció esetén



32. ábra: Horcsik-födém hőáram sűrűség ábrája higrtermikus szimuláció esetén



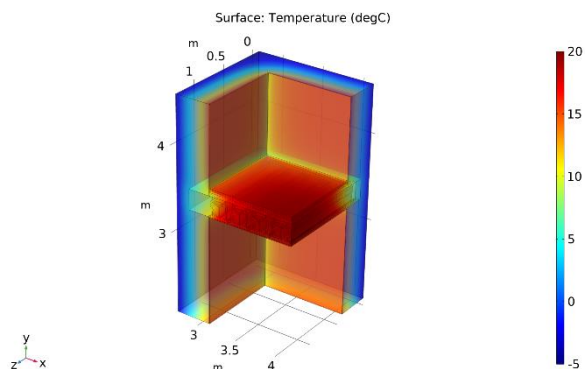
31. ábra: Horcsik-födém relatív nedvességtartalom ábrája higrtermikus szimuláció esetén



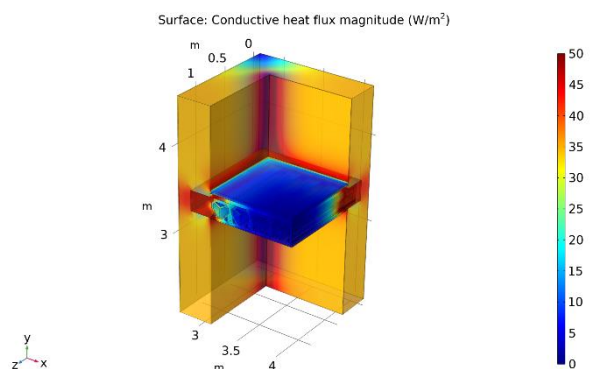
33. ábra: Horcsik-födém nedvességáram eloszlás ábrája higrtermikus szimuláció esetén

– *Bohn-födém:*

A Bohn-födém hőtechnikai szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást és hőáram sűrűséget mutató eredményábrák a 31. és 32. ábrákon kerülnek bemutatásra:

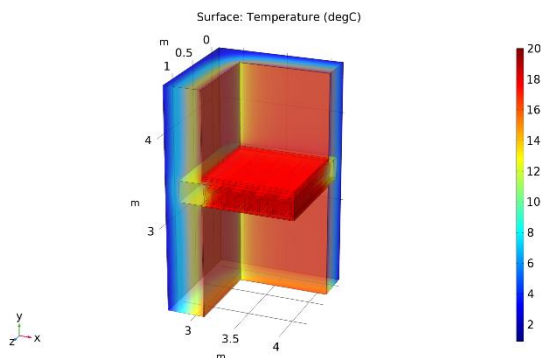


34. ábra: Bohn-födém hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

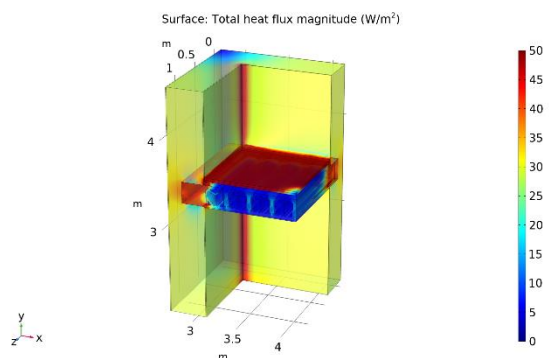


35. ábra: Bohn-födém hőáram sűrűség ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

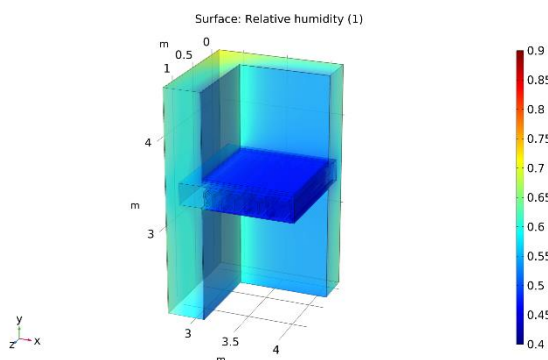
A Bohn-födém higrotermikus szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást, hőáram sűrűséget, relatív nedvességtartalmat és nedvességáram sűrűséget mutató eredményábrák a 33.-36. ábrákon kerülnek bemutatásra:



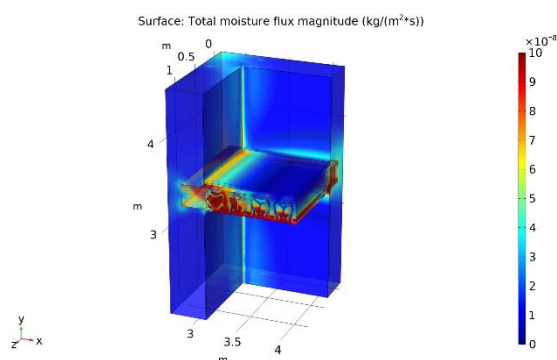
36. ábra: Bohn-födém hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimuláció esetén



38. ábra: Bohn-födém hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimuláció esetén



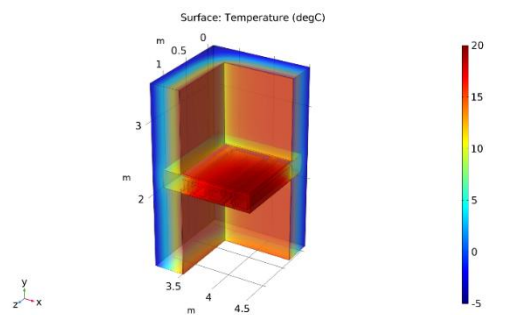
37. ábra: Bohn-födém relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimuláció esetén



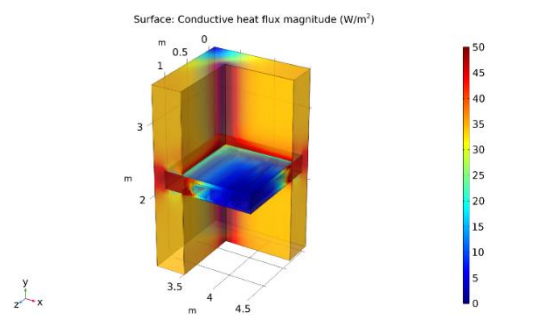
39. ábra: Bohn-födém nedvességáram eloszlás ábrája higrotermikus szimuláció esetén

– *E-gerendás födém:*

Az E-gerendás födém hőtechnikai szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást és hőáram sűrűséget mutató eredményábrák a 40. és 41. ábrákon kerülnek bemutatásra:

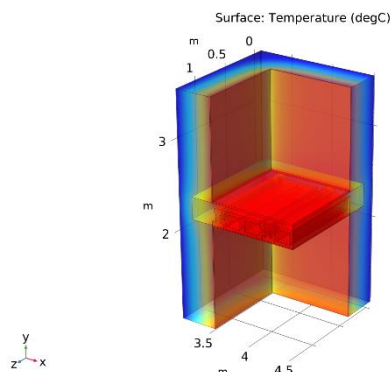


40. ábra: E-gerendás födém hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

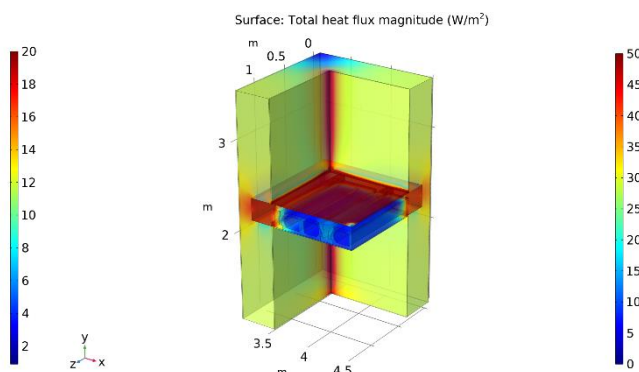


41. ábra: E-gerendás födém hőáram sűrűség ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

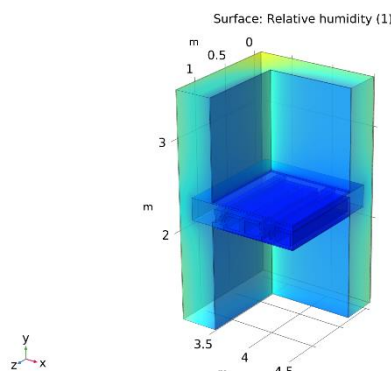
Az E-gerendás födém higrotermikus szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást, hőáram sűrűséget, relatív nedvességtartalmat és nedvességáram sűrűséget mutató eredményábrák a 39.- 42. ábrákon kerülnek bemutatásra:



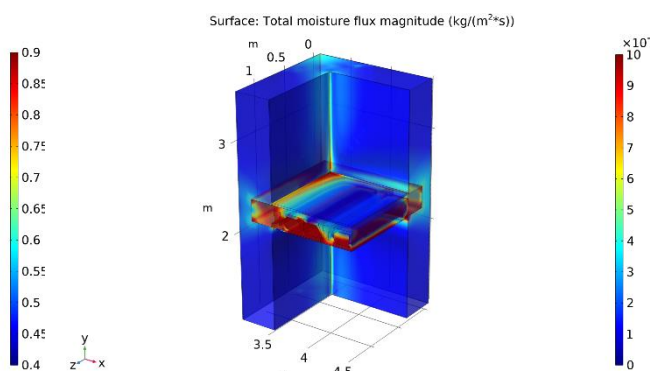
42. ábra: E-gerendás födém hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimuláció esetén



44. ábra: E-gerendás födém hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimuláció esetén



43. ábra: E-gerendás födém relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimuláció esetén

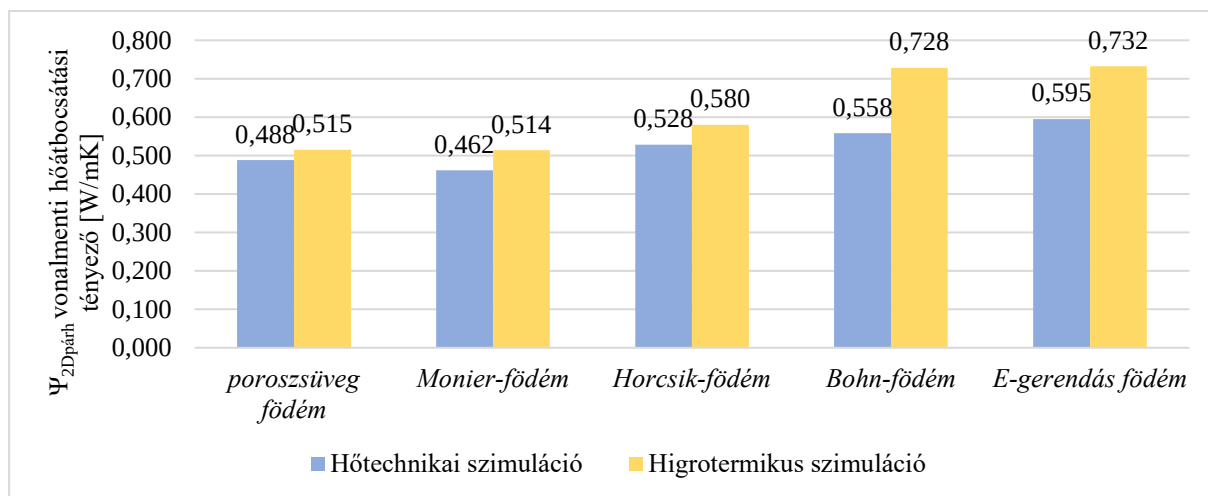


45. ábra: E-gerendás födém nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimuláció esetén

8.4. Eredmények kiértékelése, összehasonlítása

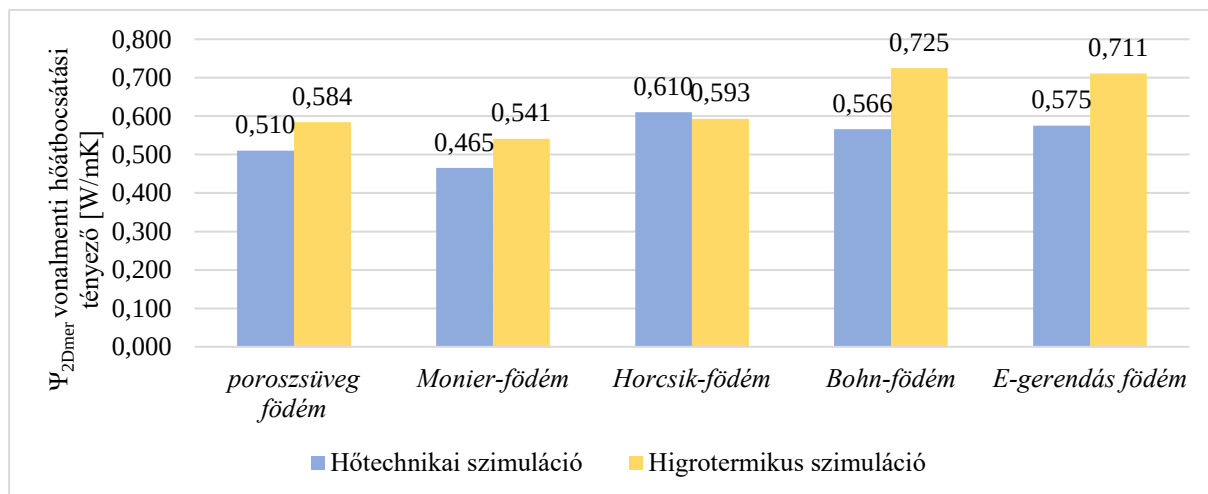
A hőtechnikai és higrotermikus szimulációk eredményeinek összehasonlítását Excel-ben készített oszlopdiagrammok segítségével végeztem el:

8.4.1. Ψ vonalmenti hőátbocsátási tényezők összehasonlítása



	poroszsüveg földem	Monier-földem	Horcsik-földem	Bohn-földem	E-gerendás földem
eltérés [%]	5,5%	11,3%	9,8%	30,5%	23,0%

46. ábra: Hőtechnikai és higrotermikus szimulációk $\Psi_{2Dpárh}$ hőátbocsátási tényezőinek összehasonlítása



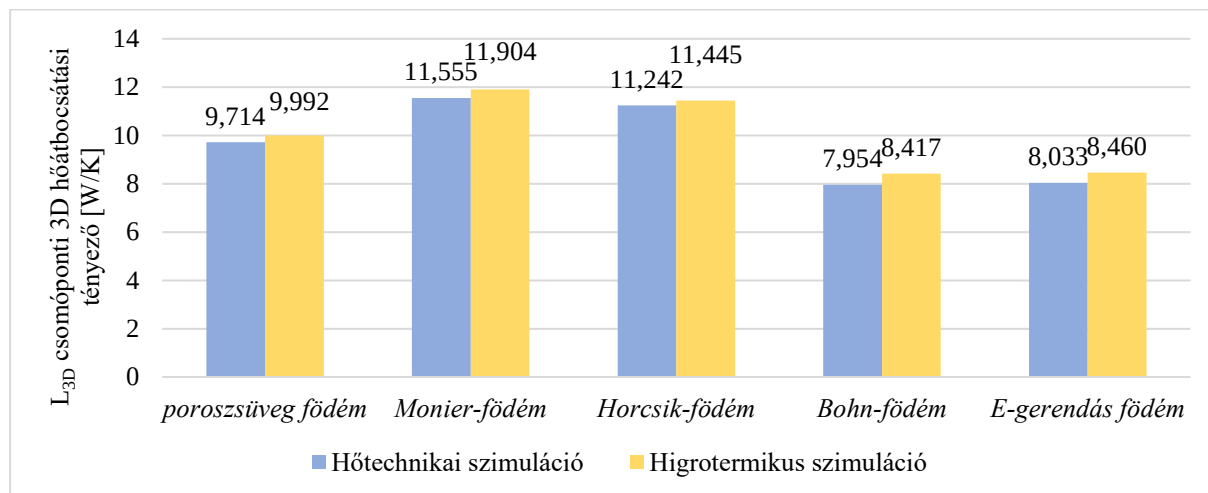
	poroszsüveg földem	Monier-földem	Horcsik-földem	Bohn-földem	E-gerendás földem
eltérés [%]	14,5%	16,3%	-2,8%	28,1%	23,7%

47. ábra: Hőtechnikai és higrotermikus szimulációk Ψ_{2Dmer} hőátbocsátási tényezőinek összehasonlítása

A fal-földem csatlakozások mentén minden esetben nagy vonalmenti hőhidak keletkeznek, ami főleg a hőtechnikailag helytelen és hiányos kialakításnak, valamint a gyenge anyagminőségeknek tudható be. A 43. és 44. ábrán lévő grafikonok alapján elmondható, hogy a higrotermikus szimuláció során a Horcsik-földem teherhordási irányra merőleges esetét

leszámítva minden esetben nagyobb vonalmenti hőátbocsátási tényezők adódnak, mind a hőtechnikai szimulációk során. A legnagyobb %-os eltérés a szimulációk között a Bohn-födém teherhordási iránnyal párhuzamos esetben adódik, ekkor a HAM szimuláció 30,5%-kal nagyobb vonalmenti hőátbocsátási tényezőt eredményez.

8.4.2. L3D csomóponti 3D-s hőátbocsátási tényezők összehasonlítása

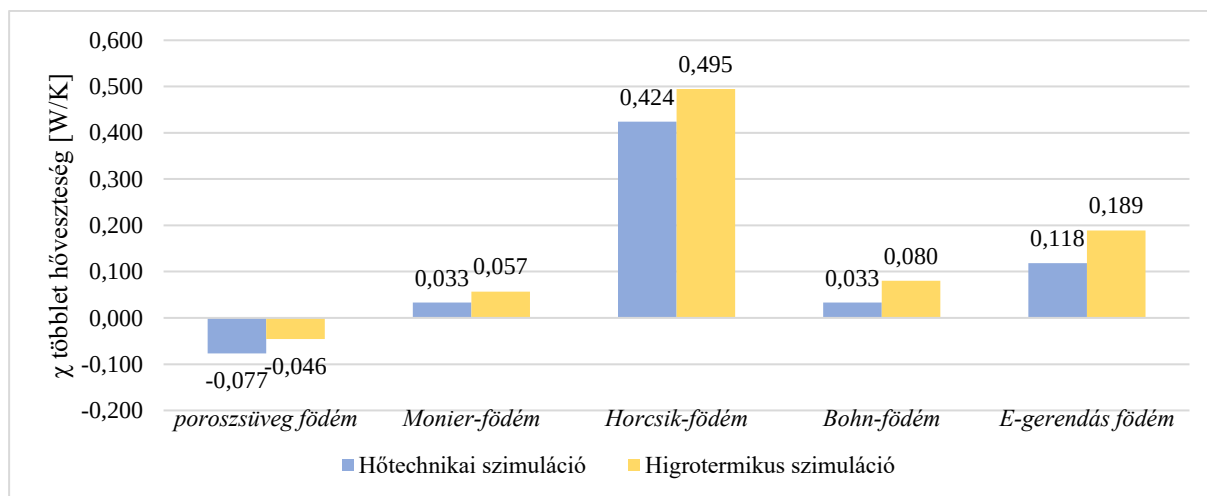


	poroszsüveg födém	Monier-födém	Horcsik-födém	Bohn-födém	E-gerendás födém
eltérés [%]	2,9%	3,3%	1,8%	5,8%	5,3%

48. ábra: Hőtechnikai és higrotermikus szimulációk L3D 3D-s csomóponti hőátbocsátási tényezőinek összehasonlítása

A csomóponti hőátbocsátási tényezők a 45. ábrán látható módon minden födém típus esetében nagyobbra adódnak HAM szimulációk során, amikor részletesebb anyagtulajdonságokat is figyelembe veszünk. Alapvetően nincs nagy eltérés a szimulációk eredményei közt, a legnagyobb különbség Bohn-födém esetében 5,8%-ra adódik, azonban ez nem jelenti azt, hogy nem szükséges higrotermikus szimulációkat végezni. Ahogy azt a csatlakozási hőhidak esetében láthattuk, a vonalmenti hőhidak esetében már jóval nagyobb eltérések adódnak, amelyek miatt a többlet hőveszteségeket jóval alábecsülhetjük, ha csak hőtechnikai szimulációkat végzünk.

8.4.3. χ többlet hőveszteségek összehasonlítása

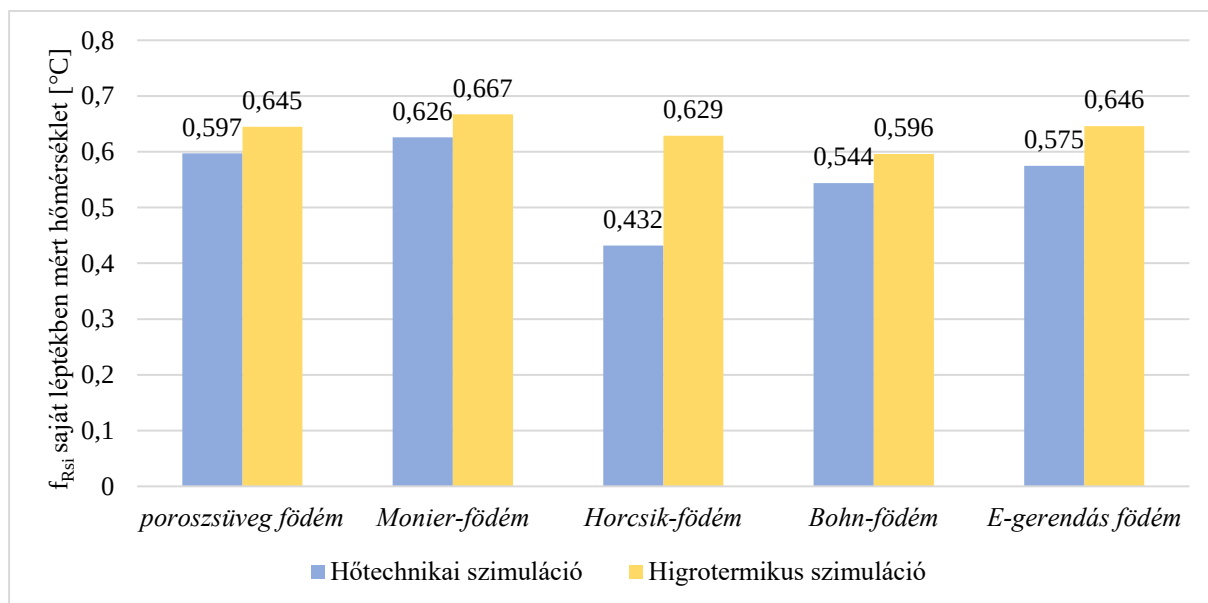


	poroszsüveg födém	Monier-födém	Horcsik-födém	Bohn-födém	E-gerendás födém
eltérés [%]	-40,3%	72,7%	16,7%	142,4%	60,2%

49. ábra: Hőtechnikai és higrotermikus szimulációk χ többlet hőveszteségeinek összehasonlítása

A többlet hőveszteségek esetében a poroszsüveg födémén kívül minden esetben nagyobbra adódnak higrotermikus szimulációk esetében. A poroszsüveg födémnél viszont negatív értékeket kapunk mindkét szimuláció esetében, ez azt jelenti, hogy tulajdonképpen a falsarok többlet hővesztesége elhanyagolható, a hőveszteség a fal-födém csatlakozási hosszain keletkezik. A Monier- és Bohn-födémek esetében olyan kis pontbeli hőátbocsátási tényezők keletkeznek, hogy ezekben az esetekben nem feltétlenül szükséges 3D-s szimulációt végezni a csomóponti hőveszteségek meghatározásához. Ellenben a Horcsik-és az E-gerendás födémeknél jóval nagyobb többlet hőveszteségek keletkeznek a csomópontban, ezek a födém típusok koszorúval kerültek kialakításra, így a nagy eltérés az anyagok hővezetési tényezőiben is hozzájárul a nagyobb hőveszteségek kialakulásához. A 46. ábra alapján látható, hogy a szimulációk közti eltérés 72,7% a Monier-födém esetében és 142,4% Bohn-födém esetében, viszont ekkor elhanyagolhatóan kicsi hőveszteségekről beszélhetünk, így érdekesebb az E-gerendás födémhez tartozó 60,2%-ot mértékadónak tekinteni. Alapvetően elmondható, hogy a pontosabb eredmények érdekében érdekesebb higrotermikus szimulációt végezni a hőveszteségek meghatározásához, hiszen ekkor a valóságot jobban megközelítő értékeket kapunk a pontosabb anyagtulajdonságok figyelembevételé miatt.

8.4.4. f_{Rsi} saját léptékben mért hőmérsékletek összehasonlítása



	poroszsüveg födém	Monier-födém	Horcsik-födém	Bohn-födém	E-gerendás födém
eltérés [%]	8,0%	6,5%	45,6%	9,6%	12,3%

50. ábra: Hőtechnikai és higrotermikus szimulációk f_{Rsi} saját léptékben mért hőmérsékleteinek összehasonlítása

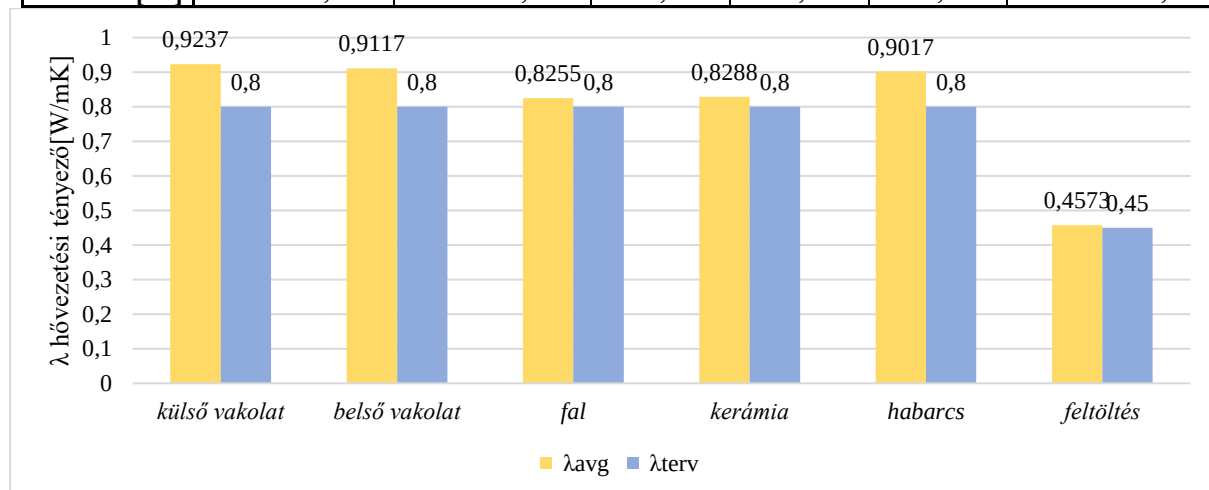
A saját léptékben mért hőmérséklet meghatározására állagvédelmi okokból van szükség. A 47. ábrán látható eredmények alapján elmondható, hogy összes födém típus eredménye 0,7 alatti számot eredményez, ez azt jelenti, hogy a csomóponti kialakítások állagvédelmi szempontból nem megfelelők, penészesedés léphet fel. A poroszsüveg födém, a Horcsik- és az E-gerendás födém hőtechnikai szimulációjának eredménye pedig 0,6-nál is kisebb eredményt adott. A hőtechnikai szimulációk minden födém típus esetében kisebb értékeket eredményeznek, ami annak köszönhető, hogy ekkor a 2. és 4. táblázat értelmében jóval kisebb minimum hőmérsékletek adódnak a belső felületeken, mint HAM szimulációkor, valamint nagyobb a külső és belső felületek közötti hőmérsékletkülönbség is.

8.4.5. λ hővezetési tényezők összehasonlítása

A hővezetési tényezők vizsgálatánál minden födém típus összes csomóponti kialakítására lekértem az egyes anyagok hővezetési tényezőjét. A hőtechnikai szimulációnál tervezési értékeket, míg a higrotermikus szimulációk esetében adott anyagra vonatkozó átlagértékeket határoztam meg.

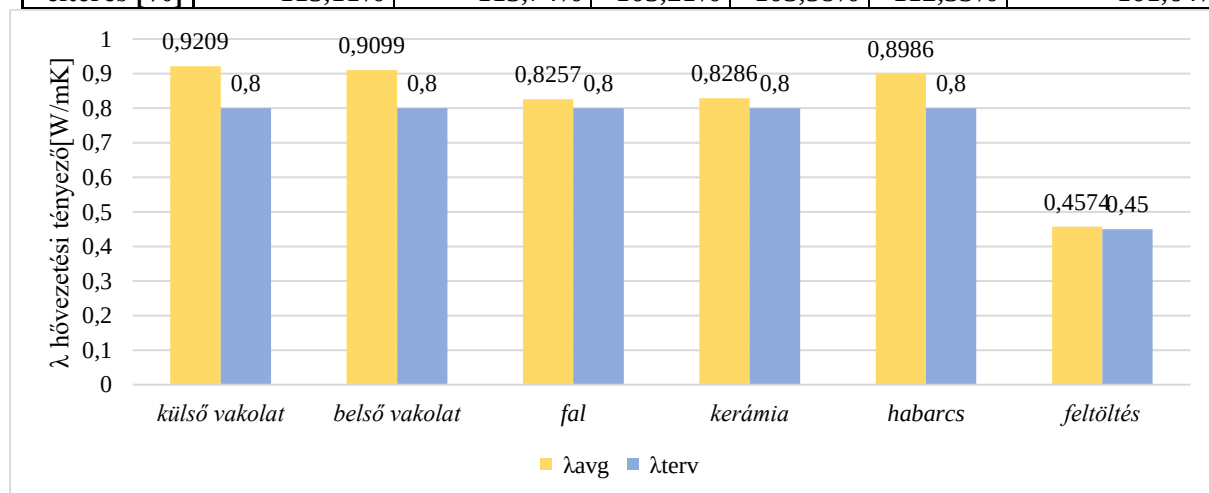
– Poroszsüveg földem

teljes csomópont						
	külső vakolat	belső vakolat	fal	kerámia	habarcs	feltöltés
λ_{avg}	0,9237	0,9117	0,8255	0,8288	0,9017	0,4573
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,45
eltérés [%]	115,46%	113,96%	103,19%	103,60%	112,71%	101,62%



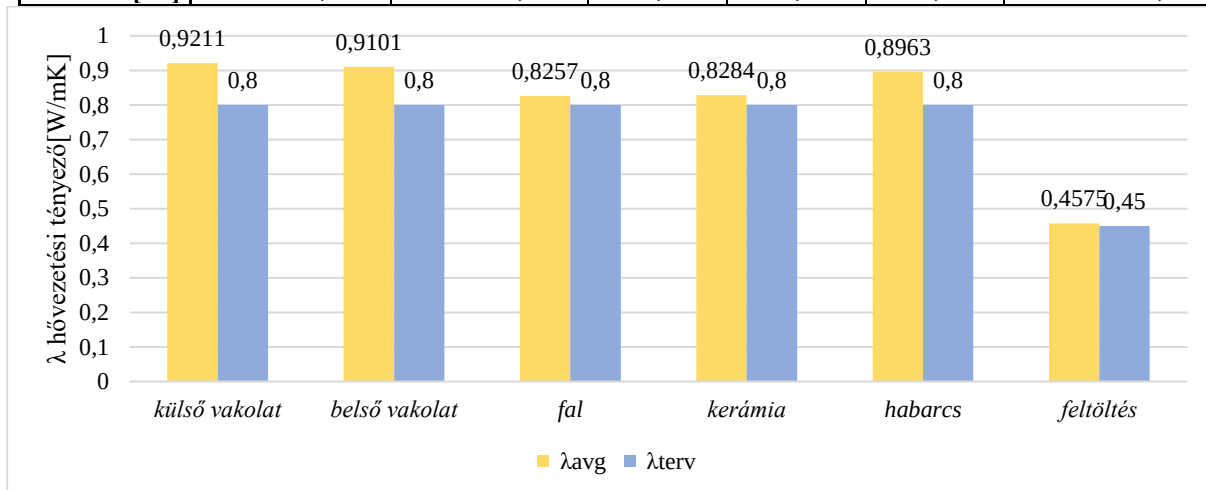
51. ábra: Hővezetési tényezők változása poroszsüveg földem teljes csomóponti kialakításakor

teherhordásra merőleges csomópont						
	külső vakolat	belső vakolat	fal	kerámia	habarcs	feltöltés
λ_{avg}	0,9209	0,9099	0,8257	0,8286	0,8986	0,4574
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,45
eltérés [%]	115,11%	113,74%	103,21%	103,58%	112,33%	101,64%



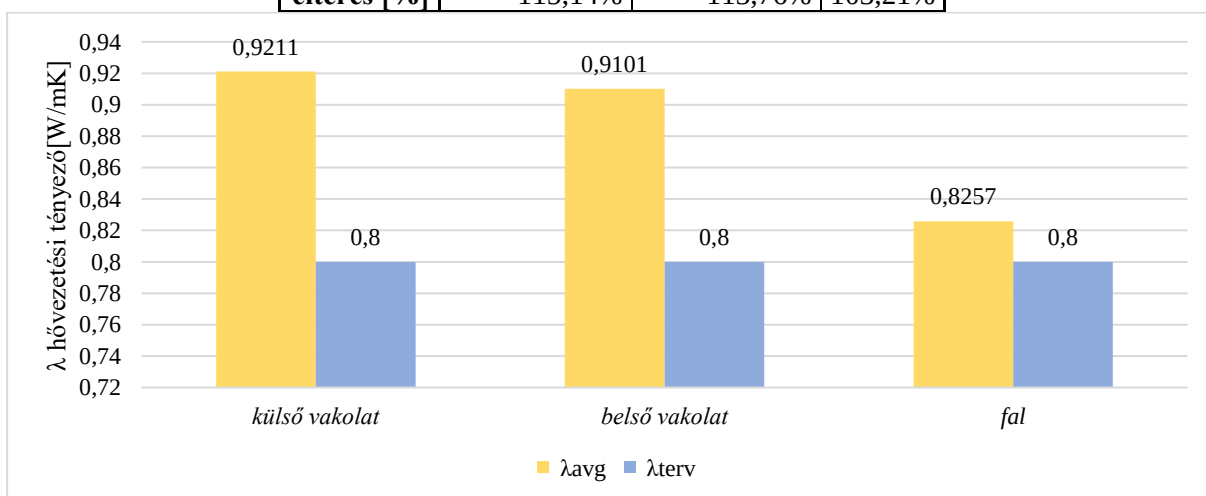
52. ábra: Hővezetési tényezők változása poroszsüveg földem teherhordási irányra merőleges csomóponti kialakításakor

teherhordással párhuzamos csomópont						
	külső vakolat	belső vakolat	fal	kerámia	habarcs	feltöltés
λ_{avg}	0,9211	0,9101	0,8257	0,8284	0,8963	0,4575
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,45
eltérés [%]	115,14%	113,76%	103,21%	103,55%	112,04%	101,67%



53. ábra: Hővezetési tényezők változása poroszsüveg földem teherhordási iránnyal párhuzamos csomóponti kialakításakor

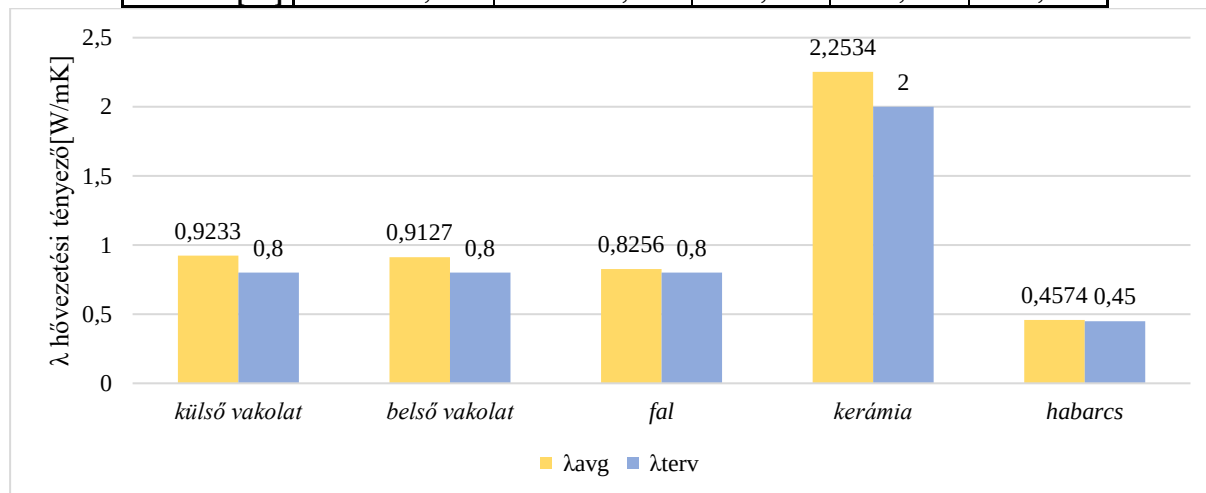
falsarok csomópont			
	külső vakolat	belső vakolat	fal
λ_{avg}	0,9211	0,9101	0,8257
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8
eltérés [%]	115,14%	113,76%	103,21%



54. ábra: Hővezetési tényezők változása poroszsüveg földem falsarok csomóponti kialakításakor

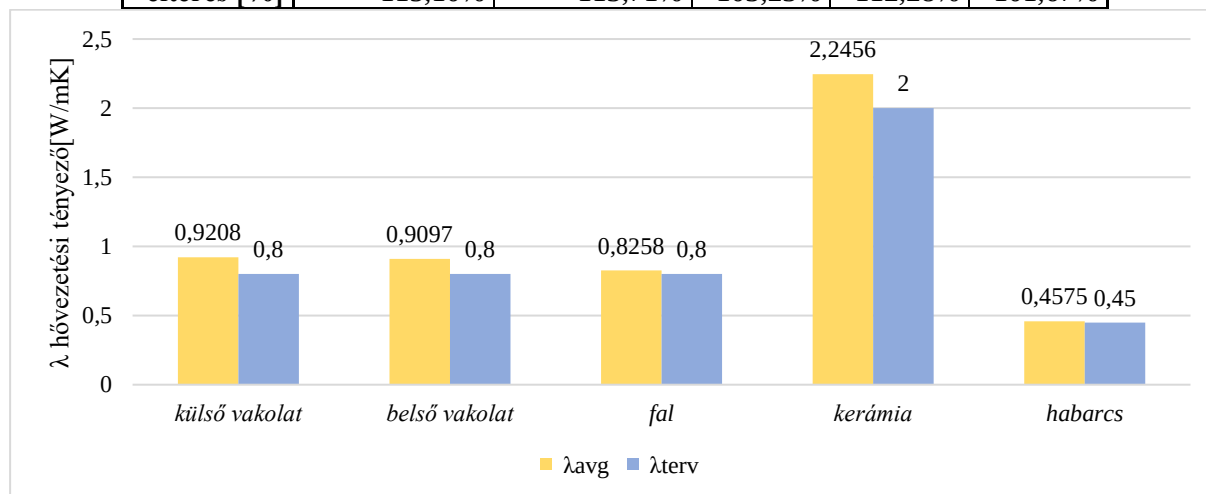
– Monier-födém

teljes csomópont					
	külső vakolat	belső vakolat	fal	beton	feltöltés
λ_{avg}	0,9233	0,9127	0,8256	2,2534	0,4574
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	2	0,45
eltérés [%]	115,41%	114,09%	103,20%	112,67%	101,64%



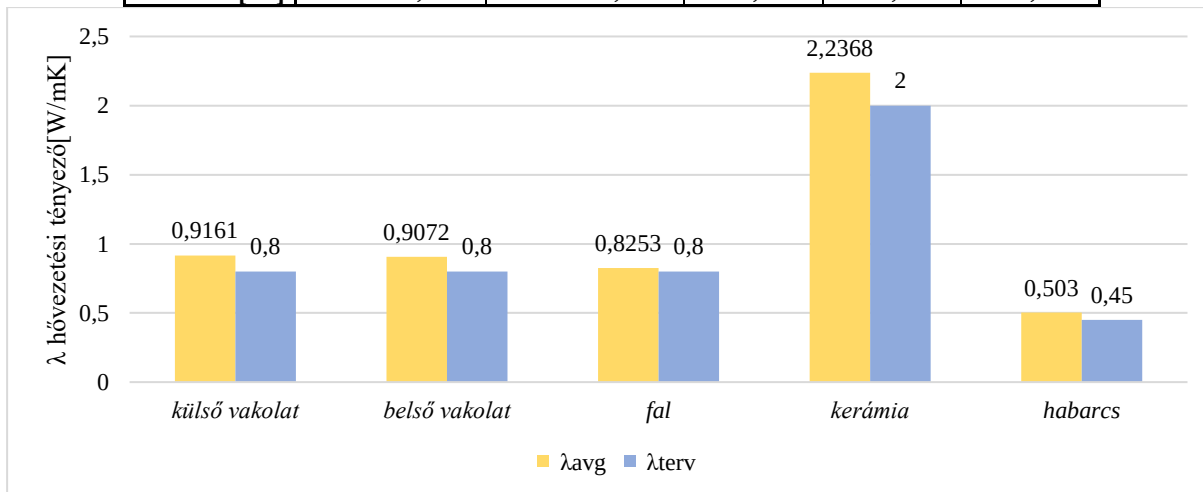
55. ábra: Hővezetési tényezők változása Monier-födém teljes csomóponti kialakításakor

teherhordásra merőleges csomópont					
	külső vakolat	belső vakolat	fal	beton	feltöltés
λ_{avg}	0,9208	0,9097	0,8258	2,2456	0,4575
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	2	0,45
eltérés [%]	115,10%	113,71%	103,23%	112,28%	101,67%



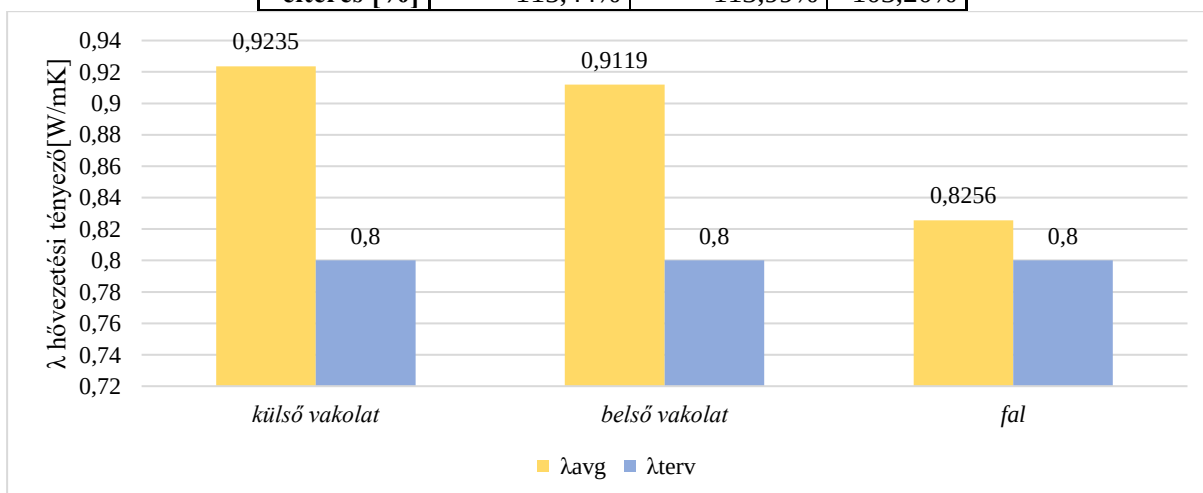
56. ábra: Hővezetési tényezők változása Monier-födém teherhordási irányra merőleges csomóponti kialakításakor

teherhordással párhuzamos csomópont					
	külső vakolat	belső vakolat	fal	beton	feltöltés
λ_{avg}	0,9161	0,9072	0,8253	2,2368	0,503
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	2	0,45
eltérés [%]	114,51%	113,40%	103,16%	111,84%	111,78%



57. ábra: Hővezetési tényezők változása Monier-födém teherhordási iránnyal párhuzamos csomóponti kialakításakor

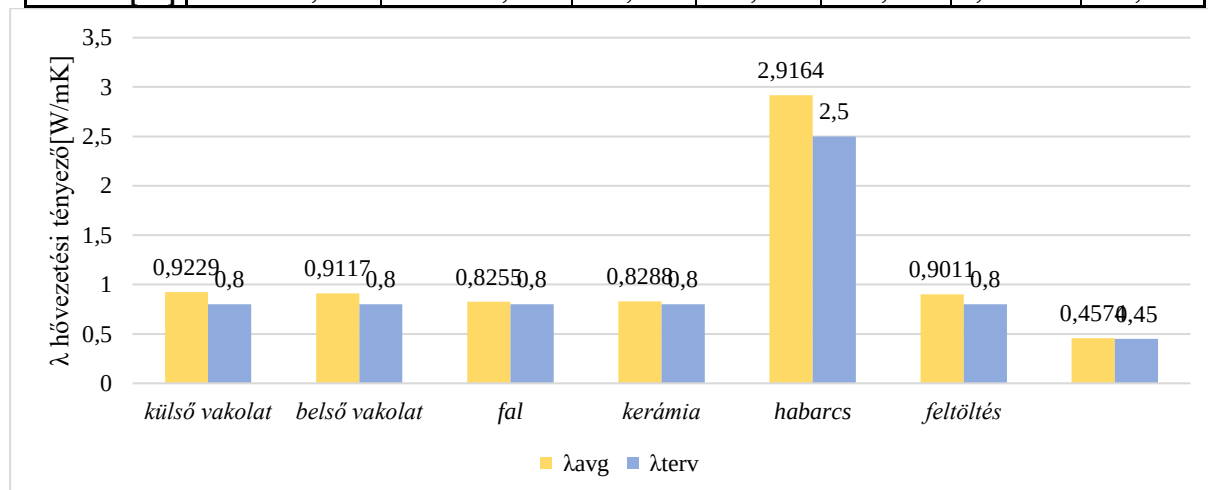
falsarok csomópont			
	külső vakolat	belső vakolat	fal
λ_{avg}	0,9235	0,9119	0,8256
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8
eltérés [%]	115,44%	113,99%	103,20%



58. ábra: Hővezetési tényezők változása Monier-födém falsarok csomóponti kialakításakor

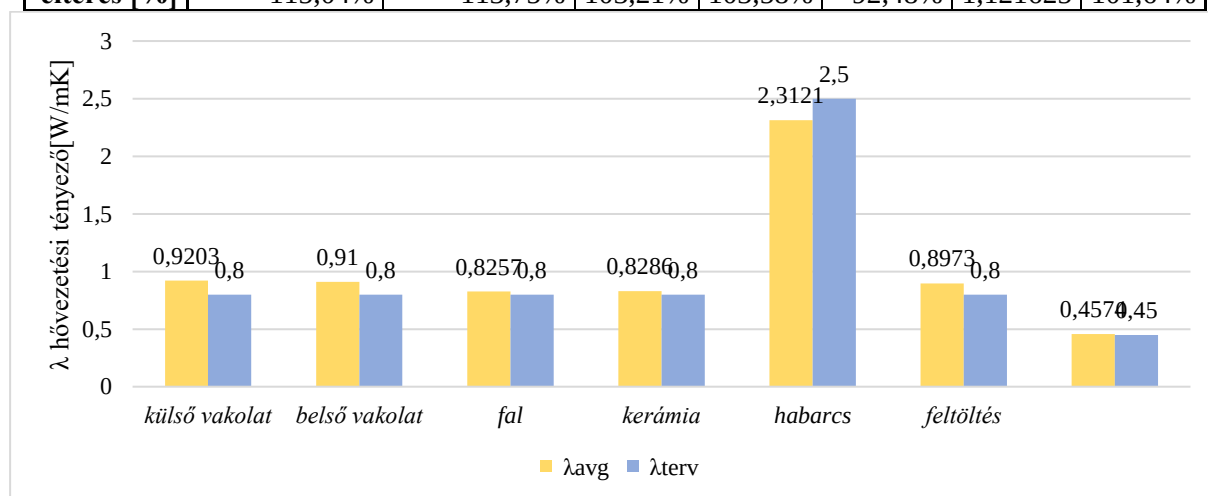
– Horcsik-födém

teljes csomópont							
	külső vakolat	belső vakolat	fal	kerámia	vasbeton	habarcs	feltöltés
λ_{avg}	0,9229	0,9117	0,8255	0,8288	2,9164	0,9011	0,4574
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	0,8	2,5	0,8	0,45
eltérés [%]	115,36%	113,96%	103,19%	103,60%	116,66%	1,126375	101,64%



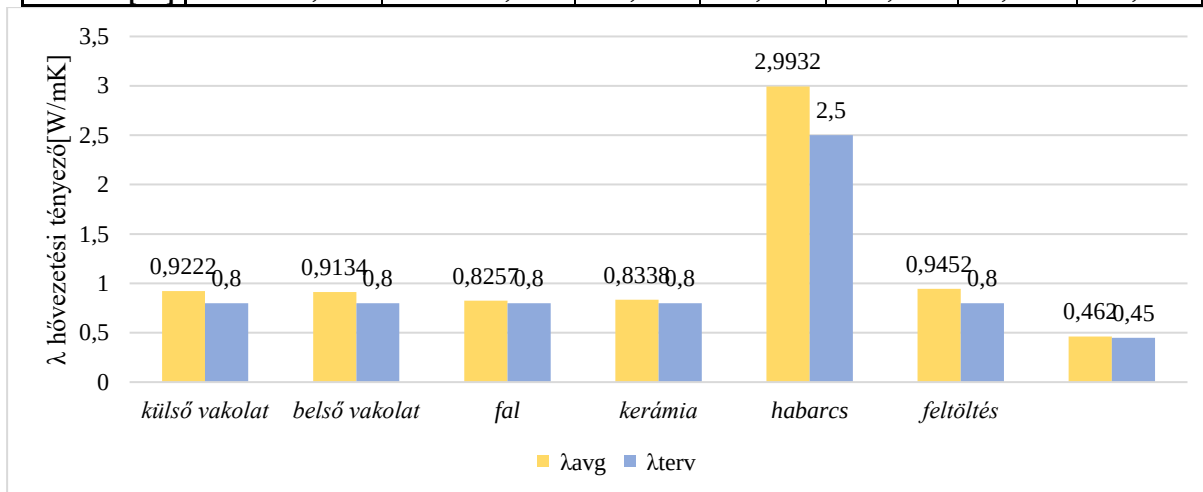
59. ábra: Hővezetési tényezők változása Horcsik-födém teljes csomóponti kialakításakor

teherhordási irányra merőleges csomópont							
	külső vakolat	belső vakolat	fal	kerámia	vasbeton	habarcs	feltöltés
λ_{avg}	0,9203	0,91	0,8257	0,8286	2,3121	0,8973	0,4574
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	0,8	2,5	0,8	0,45
eltérés [%]	115,04%	113,75%	103,21%	103,58%	92,48%	1,121625	101,64%



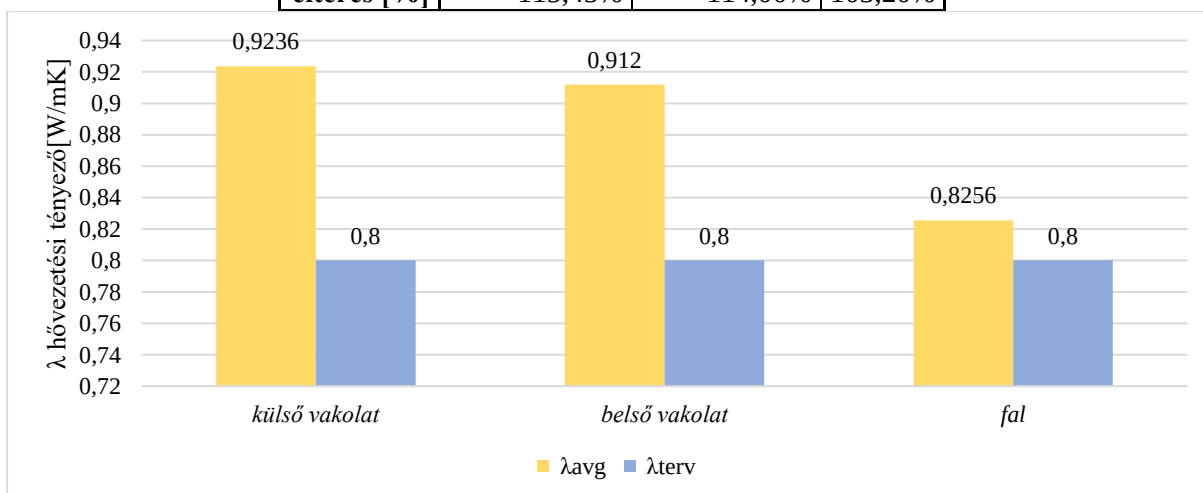
60. ábra: Hővezetési tényezők változása Horcsik-födém teherhordási irányra merőleges csomóponti kialakításakor

teherhordási iránnyal párhuzamos csomópont							
	külső vakolat	belső vakolat	fal	kerámia	vasbeton	habarcs	feltöltés
λ_{avg}	0,9222	0,9134	0,8257	0,8338	2,9932	0,9452	0,462
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	0,8	2,5	0,8	0,45
eltérés [%]	115,28%	114,18%	103,21%	104,23%	119,73%	1,1815	102,67%



61. ábra: Hővezetési tényezők változása Horcsik-födém teherhordási iránnyal párhuzamos csomóponti kialakításakor

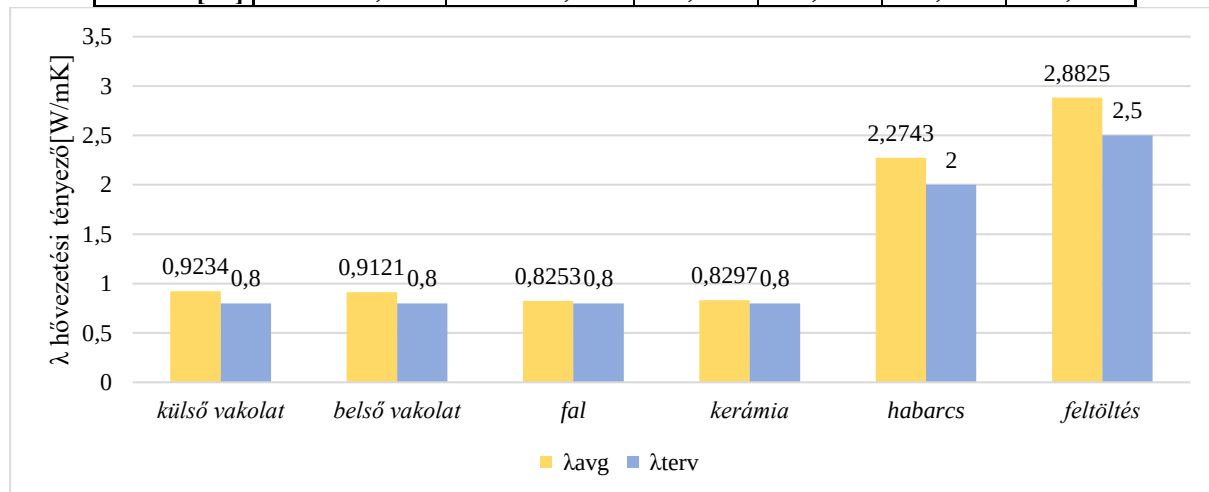
falsarok csomópont			
	külső vakolat	belső vakolat	fal
λ_{avg}	0,9236	0,912	0,8256
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8
eltérés [%]	115,45%	114,00%	103,20%



62. ábra: Hővezetési tényezők változása Horcsik-födém falsarok csomóponti kialakításakor

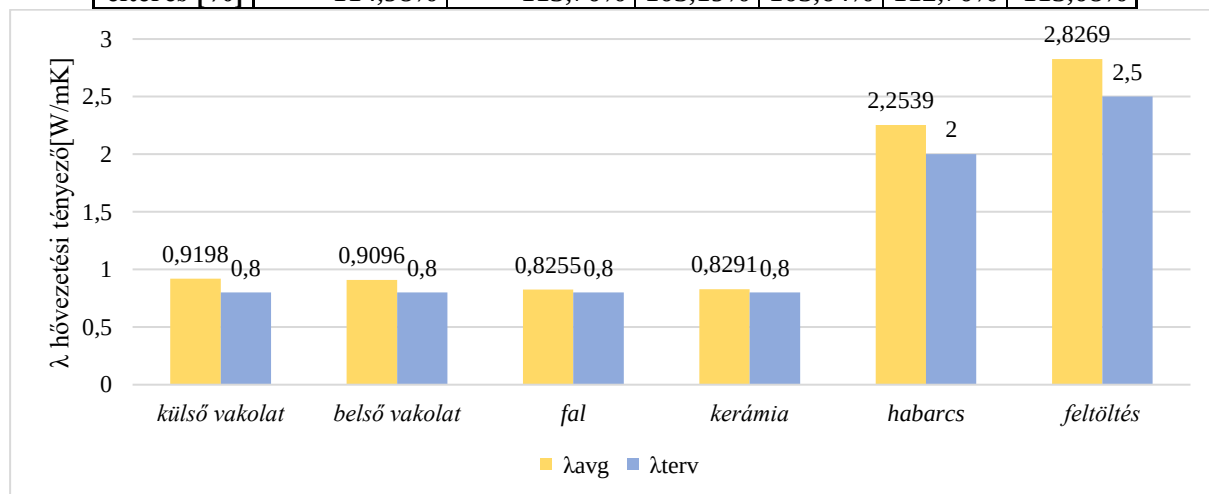
– Bohn-födém

teljes csomópont						
	külső vakolat	belső vakolat	fal	kerámia	beton	vasbeton
λ_{avg}	0,9234	0,9121	0,8253	0,8297	2,2743	2,8825
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	0,8	2	2,5
eltérés [%]	115,43%	114,01%	103,16%	103,71%	113,72%	115,30%



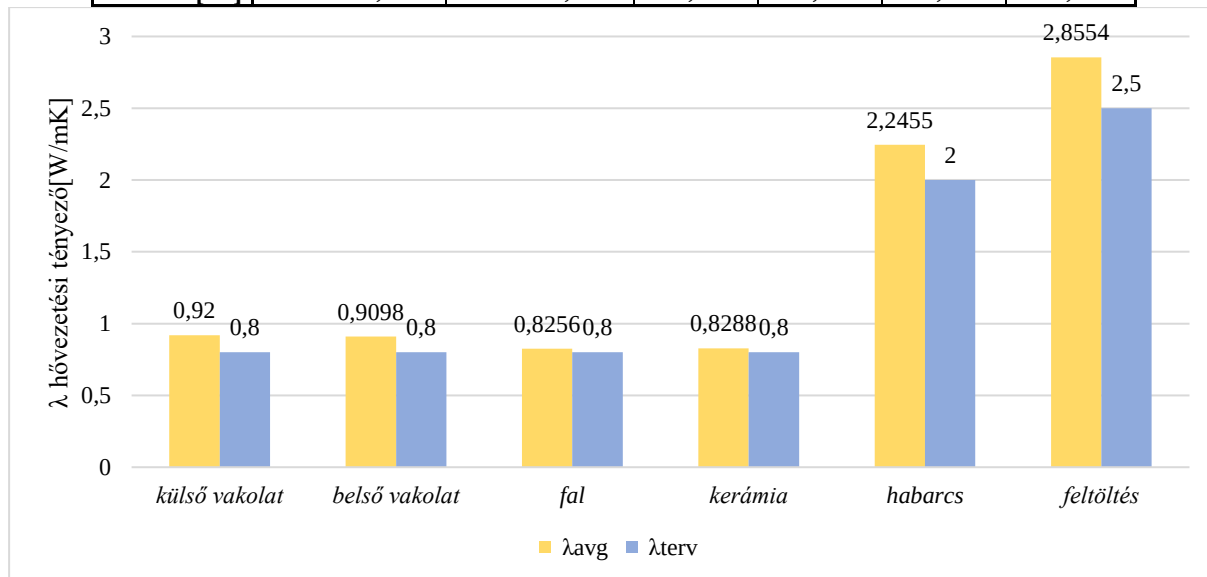
63. ábra: Hővezetési tényezők változása Bohn-födém teljes csomóponti kialakításakor

teherhordásra merőleges csomópont						
	külső vakolat	belső vakolat	fal	kerámia	beton	vasbeton
λ_{avg}	0,9198	0,9096	0,8255	0,8291	2,2539	2,8269
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	0,8	2	2,5
eltérés [%]	114,98%	113,70%	103,19%	103,64%	112,70%	113,08%



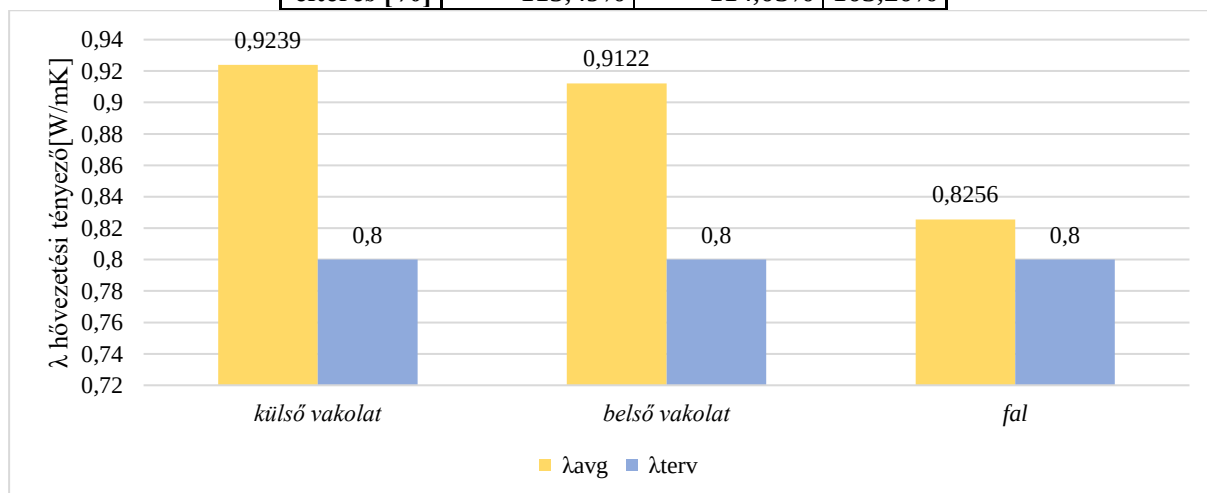
64. ábra: Hővezetési tényezők változása Bohn-födém teherhordási irányra merőleges csomóponti kialakításakor

teherhordással párhuzamos csomópont						
	külső vakolat	belső vakolat	fal	kerámia	beton	vasbeton
λ_{avg}	0,92	0,9098	0,8256	0,8288	2,2455	2,8554
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	0,8	2	2,5
eltérés [%]	115,00%	113,73%	103,20%	103,60%	112,28%	114,22%



65. ábra: Hővezetési tényezők változása Bohn-födém teherhordási iránnyal párhuzamos csomóponti kialakításakor

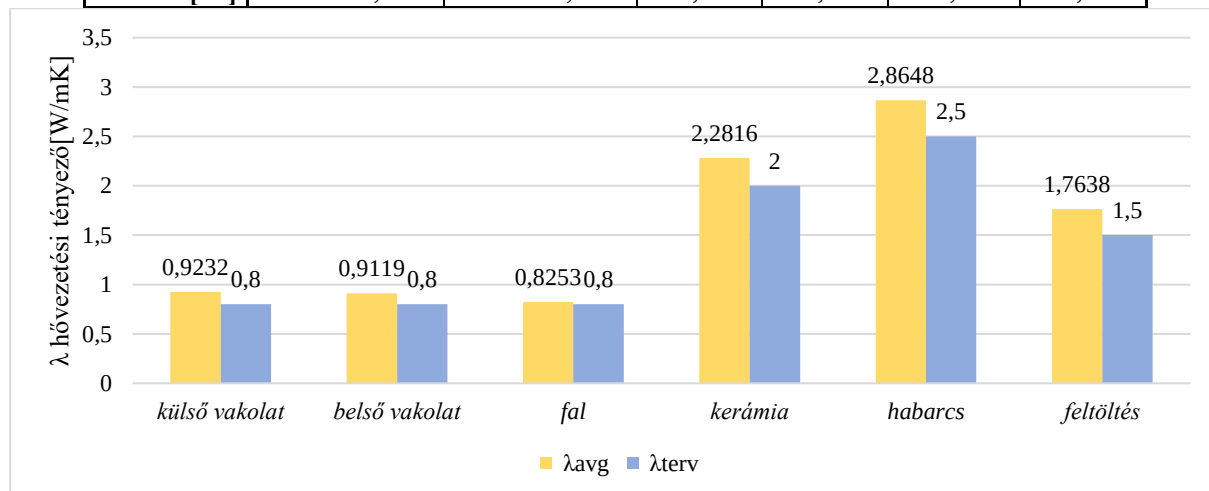
falsarok csomópont			
	külső vakolat	belső vakolat	fal
λ_{avg}	0,9239	0,9122	0,8256
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8
eltérés [%]	115,49%	114,03%	103,20%



66. ábra: Hővezetési tényezők változása Bohn-födém falsarok csomóponti kialakításakor

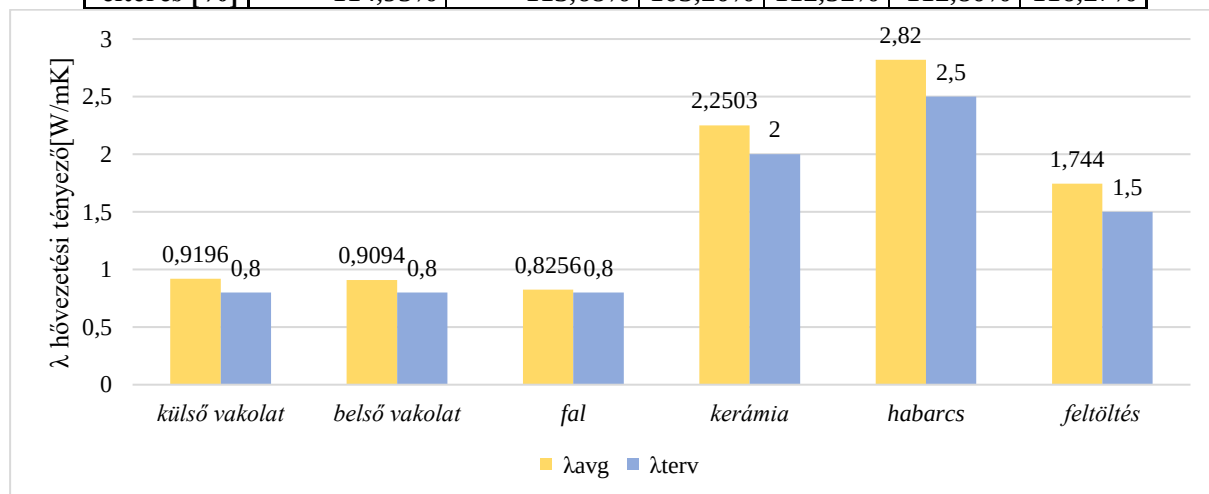
– E-gerendás födém

teljes csomópont						
	külső vakolat	belső vakolat	fal	beton	vasbeton	béléstest
λ_{avg}	0,9232	0,9119	0,8253	2,2816	2,8648	1,7638
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	2	2,5	1,5
eltérés [%]	115,40%	113,99%	103,16%	114,08%	114,59%	117,59%



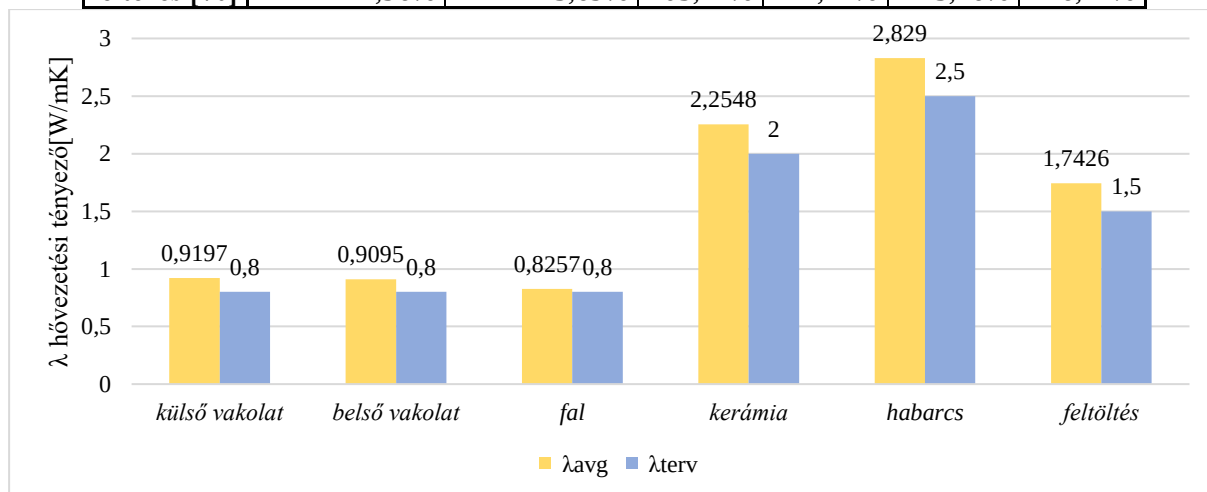
67. ábra: Hővezetési tényezők változása E-gerendás födém teljes csomóponti kialakításakor

teherhordásra merőleges csomópont						
	külső vakolat	belső vakolat	fal	beton	vasbeton	béléstest
λ_{avg}	0,9196	0,9094	0,8256	2,2503	2,82	1,744
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	2	2,5	1,5
eltérés [%]	114,95%	113,68%	103,20%	112,52%	112,80%	116,27%



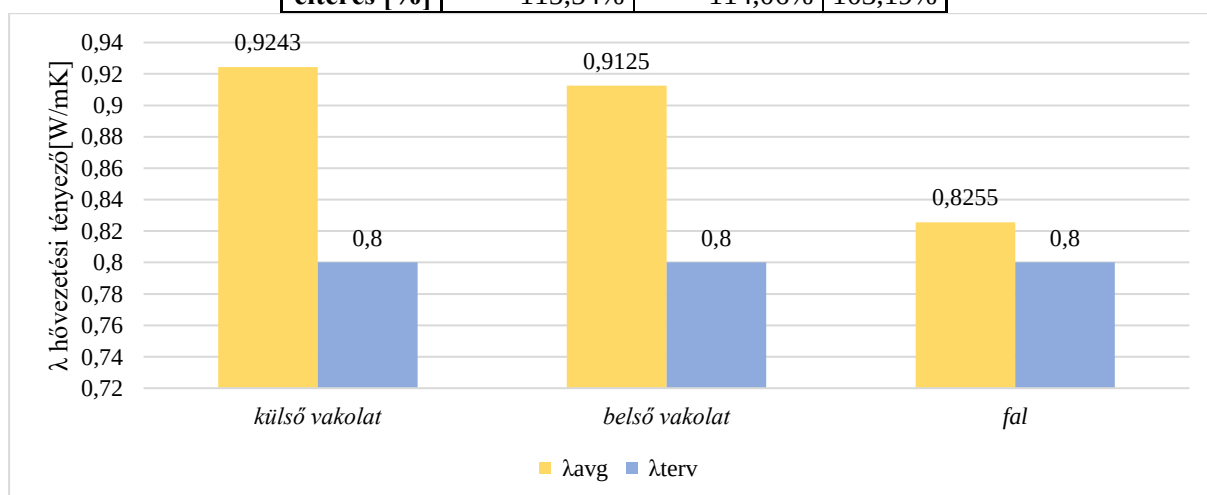
68. ábra: Hővezetési tényezők változása E-gerendás födém teherhordási irányra merőleges csomóponti kialakításakor

teherhordással párhuzamos csomópont						
	külső vakolat	belső vakolat	fal	beton	vasbeton	béléstest
λ_{avg}	0,9197	0,9095	0,8257	2,2548	2,829	1,7426
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8	2	2,5	1,5
eltérés [%]	114,96%	113,69%	103,21%	112,74%	113,16%	116,17%



69. ábra: Hővezetési tényezők változása E-gerendás földem teherhordási irányával párhuzamos csomóponti kialakításakor

falsarok csomópont			
	külső vakolat	belső vakolat	fal
λ_{avg}	0,9243	0,9125	0,8255
λ_{terv}	0,8	0,8	0,8
eltérés [%]	115,54%	114,06%	103,19%



70. ábra: Hővezetési tényezők változása E-gerendás földem falsarok csomóponti kialakításakor

Az adott födémkialakítás anyagainak hővezetési tényezőinek minimum és maximum %-os eltéréseit a következő 12-16. táblázatok foglalják össze:

– *Poroszsüveg födém*

eltérés [%]	külső vakolat	belső vakolat	fal	kerámia	habarcs	feltöltés
min	115,11%	113,74%	103,19%	103,55%	112,04%	101,62%
max	115,46%	113,96%	103,21%	103,60%	112,71%	101,67%

12. táblázat: Poroszsüveg födém anyagainak hővezetési tényezőinek %-os eltérése

– *Monier-födém*

eltérés [%]	külső vakolat	belső vakolat	fal	beton	feltöltés
min	114,51%	113,40%	103,16%	111,84%	101,64%
max	115,44%	114,09%	103,23%	112,67%	111,78%

13. táblázat: Monier-födém anyagainak hővezetési tényezőinek %-os eltérése

– *Horcsik-födém*

eltérés [%]	külső vakolat	belső vakolat	fal	kerámia	vasbeton	habarcs	feltöltés
min	115,04%	113,75%	103,19%	103,58%	92,48%	112,16%	101,64%
max	115,45%	114,18%	103,21%	104,23%	119,73%	118,15%	102,67%

14. táblázat: Horcsik-födém anyagainak hővezetési tényezőinek %-os eltérése

– *Bohn-födém*

eltérés [%]	külső vakolat	belső vakolat	fal	kerámia	beton	vasbeton
min	114,98%	113,70%	103,16%	103,60%	112,28%	113,08%
max	115,49%	114,03%	103,20%	103,71%	113,72%	115,30%

15. táblázat: Bohn-födém anyagainak hővezetési tényezőinek %-os eltérése

– *E-gerendás födém*

eltérés [%]	külső vakolat	belső vakolat	fal	beton	vasbeton	béléstest
min	114,95%	113,68%	103,16%	112,52%	112,80%	116,17%
max	115,54%	114,06%	103,21%	114,08%	114,59%	117,59%

16. táblázat: E-gerendás födém anyagainak hővezetési tényezőinek %-os eltérése

Az eredmények kiértékeléséből látható, hogy míg a fal, kerámia és feltöltés egyik esetben sem tér el 5%-nál jobban a tervezési értékektől, addig a többi anyag esetében akár 15-18%-os eltéréseket is tapasztalhatunk a hígrotermikus szimuláció esetében figyelembe vett átlagos hővezetési tényezők esetében. Az eredmények azt is mutatják, hogy a Horcsik-födém esetét leszámítva, ahol a vasbetonra a tervezési $2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ értéknél kisebbre adódik az átlagos hővezetési tényező, a hígrotermikus szimuláció során figyelembe vett hővezetési tényezők mindig magasabbak, mint a tervezési értékek. Ez azt is jelenti, hogy hőtechnikai szimulációk esetében, ahol tervezési értékeket veszünk figyelembe alábecsüljük az anyagok hővezetési tényezőjét. Ennek eredménye megmutatkozik a szimulációk során számolt csomóponti, vonalmenti és többlet hőveszteségekben is, hiszen az eredmények azt mutatták, hogy hőtechnikai szimulációkkal számolt hőveszteségek alacsonyabbak, mint a hígrotermikus szimulációk során kaptak.

9. Energiahatékonysági célú felújítás lehetőségei

Dolgozatom egyik feladata a meglévő fűdém szerkezetek csomóponti kialakításának energiahatékonysági célú felújítási lehetőségeinek vizsgálata és kidolgozása. Ahogy azt a hőtechnikai és higrotermikus szimulációk eredményei is mutatták egyik csomóponti kialakítás sem elégíti ki az energetikai és az állagvédelmi követelmény értékeit. Amennyiben műemléki vagy helyi védelem alatt álló épületekről van szó, úgy a 7/2006 TNM rendelet [43] értelmében az adott épületnek vagy épületrésznek nem kell megfelelni az energiahatékonyságra vonatkozó minimumkövetelményeknek, ha ezek betartása a műemléki vagy a helyi védeltséget megalapozó érték megváltoztatását eredményezné. Emiatt a felújítási opciók során különböző vastagságban felhelyezett belső oldali hőszigetelést és hőszigetelő vakolatot vizsgáltam és elsősorban az állagvédelmi megfeleltetést vettem fő szempontnak. Minden fűdém típusra kidolgoztam 1-1 olyan felújítási változatot, amely esetében a saját léptékben mért hőmérséklet 0,7 feletti értékre adódik, így állagvédelmi szempontból megfelel, ezen kívül figyelembe vettem, hogy energiahatékonysági szempontból is kedvezőbb kialakítás legyen, mint az eredeti állapotban.

9.1. Felújítási opciók eredményei

A higrotermikus szimulációkat a 6. fejezetben ismertetett módszertan, az eredmények kiértékelését a 7. fejezetben ismertetett módszertan alapján készítettem. A számításokhoz szükséges adatokat és a geometriai modellekből lekért adatokat a dolgozat mellékletének 2-4. táblázatai tartalmazzák. A 17. táblázatban az eredeti rétegrendi kialakítások higrotermikus szimulációiból származó eredmények összefoglaló táblázata látható, míg a 18-23. számú táblázatok a felújítási opciók eredményeinek kiértékeléséhez szükséges főbb adatokat tartalmazzák. Az eredmények közül zölddel kiemeltem azokat a saját léptékben mért hőmérsékleteket (f_{Rsi}), amelyek megfelelnek az állagvédelmi követelményeknek. A dolgozatban a továbbiakban ezek a felújítási opciók lettek kidolgozva egyes fűdém típusok esetében.

– *eredeti rétegrendek higrotermikus szimulációja*

	Higrotermikus szimuláció				
	E gerendás födém	Horcsik- födém	Bohn- födém	Monier- födém	poroszsüveg födém
$Q_{össz}$ [W]	161,580	218,590	160,770	227,360	190,840
U_{fal} [W/m ² K]	2,093	2,147	2,257	2,032	2,097
T_{min} [degC]	13,246	12,912	12,282	13,644	13,221
L_{3D} [W/K]	8,460	11,445	8,417	11,904	9,992
$\Psi_{párhuz}$ [W/mK]	0,732	0,580	0,728	0,514	0,515
Ψ_{mer} [W/mK]	0,711	0,593	0,725	0,541	0,584
$\Psi_{falcsatl}$ [W/mK]	0,265	0,280	0,265	0,265	0,280
f_{rsi} [-]	0,646	0,629	0,596	0,667	0,645

17. táblázat: Eredeti rétegrendek higrotermikus szimulációjából származó eredmények

– *1. felújítási változat*

	5 cm hőszigetelés belső oldalon				
	E gerendás födém	Horcsik- födém	Bohn- födém	Monier- födém	poroszsüveg födém
$Q_{össz}$ [W]	86,231	108,240	83,849	114,210	97,246
U_{fal} [W/m ² K]	0,530	0,530	0,530	0,530	0,530
T_{min} [degC]	13,228	12,110	12,803	13,293	13,362
L_{3D} [W/K]	4,515	5,667	4,390	5,980	5,091
$\Psi_{párhuz}$ [W/mK]	1,132	1,087	1,052	0,882	0,827
Ψ_{mer} [W/mK]	1,097	1,031	1,045	0,884	0,877
$\Psi_{falcsatl}$ [W/mK]	0,556	2,841	0,123	0,149	0,132
f_{rsi} [-]	0,645	0,587	0,623	0,649	0,652

18. táblázat: 1. felújítási változat higrotermikus szimulációjából származó eredmények

– *2. felújítási változat*

	1-1 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon				
	E gerendás födém	Horcsik- födém	Bohn- födém	Monier- födém	poroszsüveg födém
$Q_{össz}$ [W]	111,260	149,320	121,250	156,000	130,670
U_{fal} [W/m ² K]	0,940	0,940	0,940	0,940	0,940
T_{min} [degC]	13,485	13,210	12,761	13,753	12,983
L_{3D} [W/K]	5,825	7,818	6,348	8,168	6,841
$\Psi_{párhuz}$ [W/mK]	0,616	0,592	0,603	0,463	0,452
Ψ_{mer} [W/mK]	0,600	0,580	0,603	0,473	0,502
$\Psi_{falcsatl}$ [W/mK]	0,233	0,261	0,245	0,257	0,256
f_{rsi} [-]	0,659	0,645	0,621	0,673	0,633

19. táblázat: 2. felújítási változat higrotermikus szimulációjából származó eredmények

– 3. felújítási változat

	2-2 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon				
	E gerendás födém	Horcsik- födém	Bohn- födém	Monier- födém	poroszsüveg födém
$Q_{össz}$ [W]	85,484	114,950	85,955	121,930	102,230
U_{fal} [W/m ² K]	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700
T_{min} [degC]	14,204	14,182	13,359	14,556	13,767
L_{3D} [W/K]	4,476	6,018	4,500	6,384	5,352
$\Psi_{párhuz}$ [W/mK]	0,515	0,530	0,511	0,427	0,420
Ψ_{mer} [W/mK]	0,439	0,512	0,511	0,431	0,452
$\Psi_{falcsatl}$ [W/mK]	1,134	0,177	0,167	1,008	0,175
f_{rsi} [-]	0,697	0,695	0,652	0,715	0,674

20. táblázat: 3. felújítási változat higrotermikus szimulációjából származó eredmények

– 4. felújítási változat

	3-3 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon				
	E gerendás födém	Horcsik- födém	Bohn- födém	Monier- födém	poroszsüveg födém
$Q_{össz}$ [W]	70,071	105,720	70,041	100,070	83,906
U_{fal} [W/m ² K]	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550
T_{min} [degC]	14,730	14,972	13,897	14,975	14,264
L_{3D} [W/K]	3,669	5,535	3,667	5,239	4,393
$\Psi_{párhuz}$ [W/mK]	0,464	0,478	0,460	1,210	0,389
Ψ_{mer} [W/mK]	0,454	0,462	0,460	0,398	0,474
$\Psi_{falcsatl}$ [W/mK]	0,550	0,156	-0,299	0,154	0,153
f_{rsi} [-]	0,724	0,737	0,680	0,737	0,700

21. táblázat: 4. felújítási változat higrotermikus szimulációjából származó eredmények

– 5. felújítási változat

	5 cm hőszigetelés belső oldalon + 1 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon				
	E gerendás födém	Horcsik- födém	Bohn- födém	Monier- födém	poroszsüveg födém
$Q_{össz}$ [W]	74,894	94,790	73,715	101,320	86,380
U_{fal} [W/m ² K]	0,490	0,490	0,490	0,490	0,490
T_{min} [degC]	14,360	13,043	13,663	13,979	14,036
L_{3D} [W/K]	3,921	4,963	3,859	5,305	4,523
$\Psi_{párhuz}$ [W/mK]	0,857	0,839	0,811	0,696	0,660
Ψ_{mer} [W/mK]	0,835	0,801	0,808	0,697	0,698
$\Psi_{falcsatl}$ [W/mK]	0,087	0,119	0,104	0,123	0,111
f_{rsi} [-]	0,705	0,636	0,668	0,685	0,688

22. táblázat: 5. felújítási változat higrotermikus szimulációjából származó eredmények

– 6. felújítási változat

	5 cm hőszigetelés belső oldalon + 2 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon				
	E gerendás földem	Horcsik-földem	Bohn-földem	Monier-földem	poroszsüveg földem
$Q_{össz}$ [W]	-	-	64,633	-	-
U_{fal} [W/m ² K]	-	-	0,430	-	-
T_{min} [degC]	-	-	14,497	-	-
L_{3D} [W/K]	-	-	3,384	-	-
$\Psi_{párhuz}$ [W/mK]	-	-	1,191	-	-
Ψ_{mer} [W/mK]	-	-	1,202	-	-
$\Psi_{falcsatl}$ [W/mK]	-	-	0,311	-	-
f_{rsi} [-]	-	-	0,712	-	-

23. táblázat: 6. felújítási változat higrotermikus szimulációjából származó eredmények

Az eredmények alapján földemenként 1 felújítási opció került kiválasztásra és kidolgozásra, amelyek a következők:

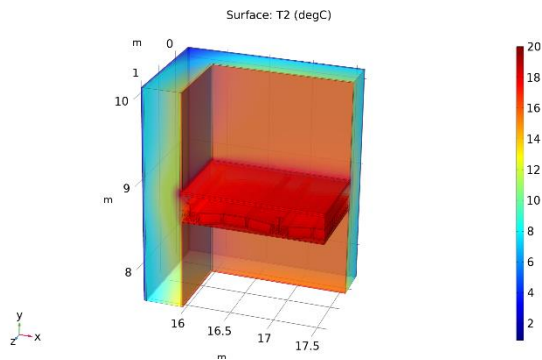
- *poroszsüveg földem*: 3-3 cm hőszigetelő vakolat külső és belső oldalon
- *Monier-földem*: 2-2 cm hőszigetelő vakolat külső és belső oldalon
- *Horcsik-földem*: 3-3 cm hőszigetelő vakolat külső és belső oldalon
- *Bohn-földem*: 5 cm belső oldali hőszigetelés 2 cm belső oldali vakolattal + 2 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon
- *E-gerendás földem*: 5 cm belső oldali hőszigetelés 1 cm belső oldali vakolattal + 1 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon

9.2. Eredmények vizualizálása

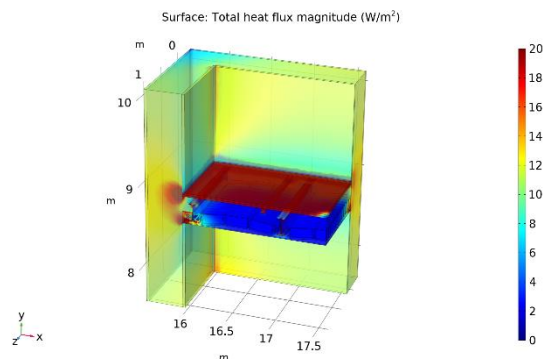
Minden földemtípus felújított rétegrendi kialakításának higrotermikus szimulációja során lekértem Comsol Multiphysics szoftverből a hőmérsékleteloszlás, hőáramsűrűség eloszlás, relatív nedvességtartalom, valamint a nedvességáram sűrűség ábrákat. A dolgozatban terjedelmi korlátok miatt csak a teljes csomóponti kialakításra vonatkozó ábrák szerepelnek.

– *Poroszsüveg földem*

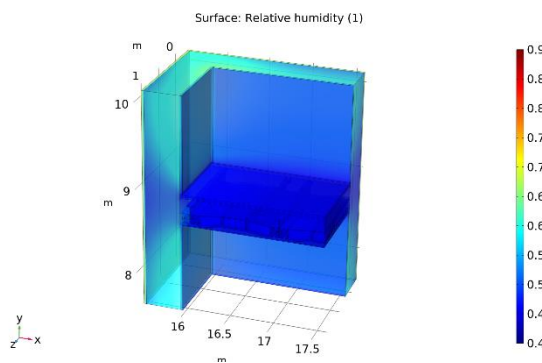
A felújított rétegrendű poroszsüveg földem higrotermikus szimulációjához tartozó eredményábrák a 71-74. ábrákon kerülnek bemutatásra:



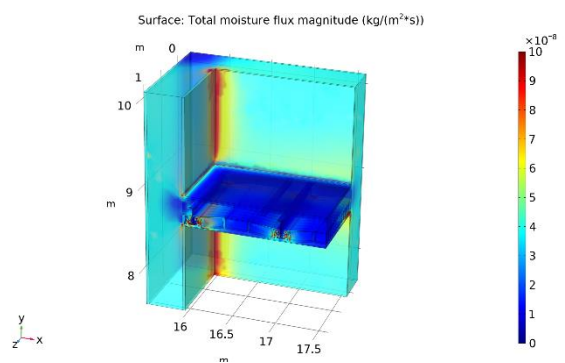
71. ábra: Felújított poroszsüveg földem hőmérséklet eloszlás ábrája



72. ábra: Felújított poroszsüveg földem hőáram sűrűség ábrája



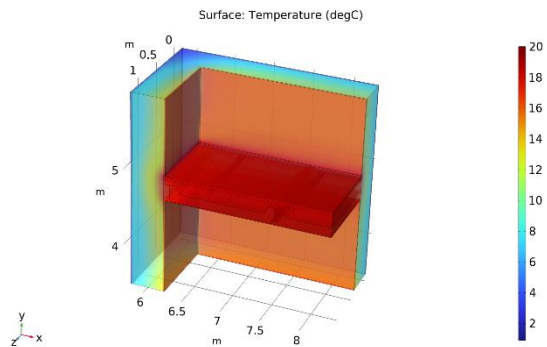
73. ábra: Felújított poroszsüveg földem nedvességtartalom ábrája



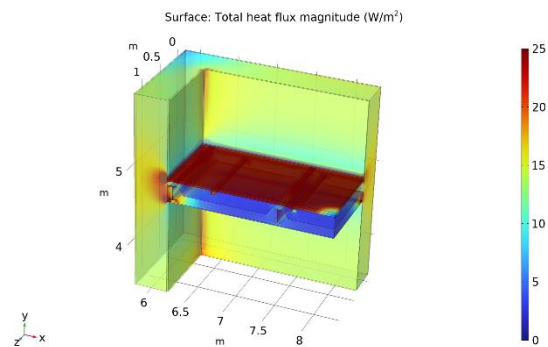
74. ábra: Felújított poroszsüveg földem nedvességáram sűrűség ábrája

– *Monier-födém*

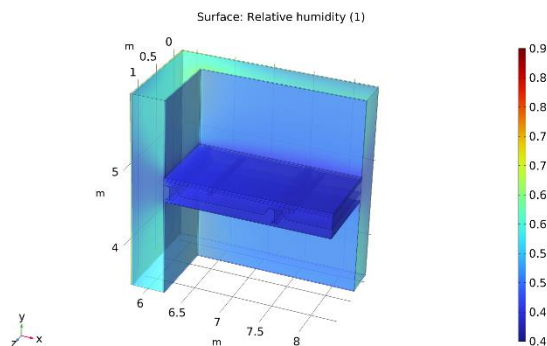
A felújított rétegrendű Monier-födém higrotermikus szimulációjához tartozó eredményábrák a 75-78. ábrákon kerülnek bemutatásra:



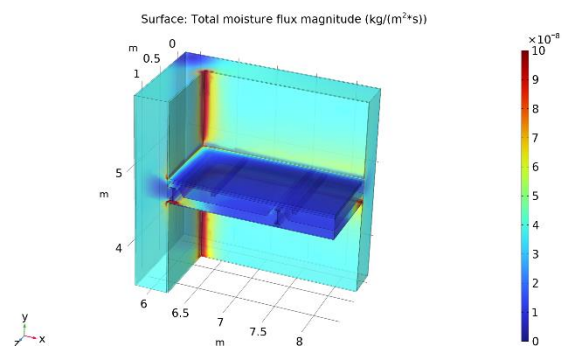
75. ábra: Felújított Monier-födém hőmérséklet eloszlás ábrája



76. ábra: Felújított Monier-födém hőáram sűrűség ábrája



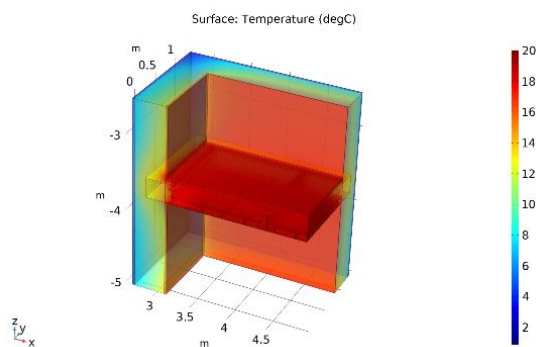
77. ábra: Felújított Monier-födém nedvességtartalom ábrája



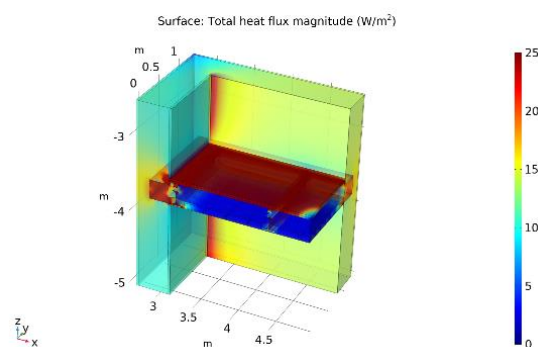
78. ábra: Felújított Monier-födém nedvességáram sűrűség ábrája

– Horcsik-födém

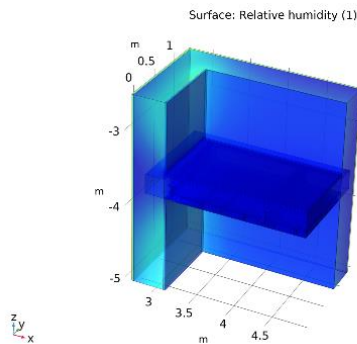
A felújított rétegrendű Horcsik-födém higrotermikus szimulációjához tartozó eredményábrák a 79-82. ábrákon kerülnek bemutatásra:



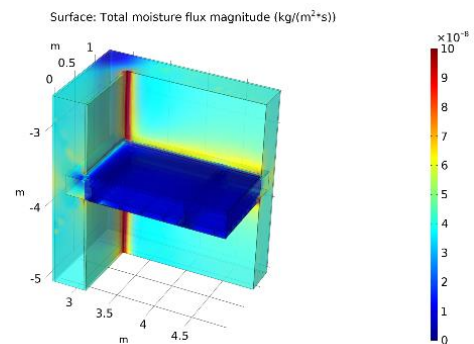
79. ábra: Felújított Horcsik-födém hőmérséklet eloszlás ábrája



80. ábra: Felújított Horcsik-födém hőáram sűrűség ábrája



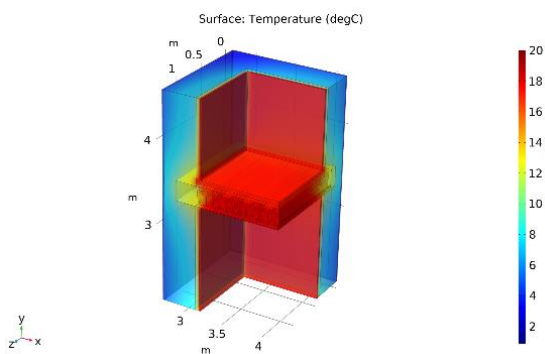
81. ábra: Felújított Horcsik-födém nedvességtartalom ábrája



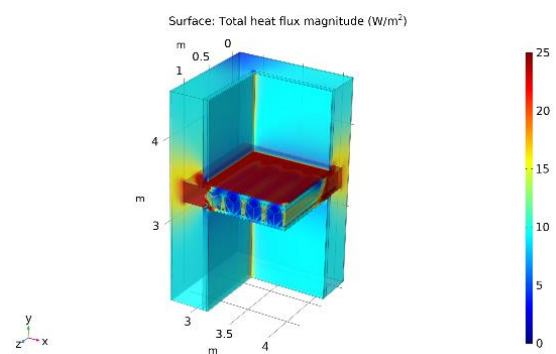
82. ábra: Felújított Horcsik-födém nedvességáram sűrűség ábrája

– Bohn-födém

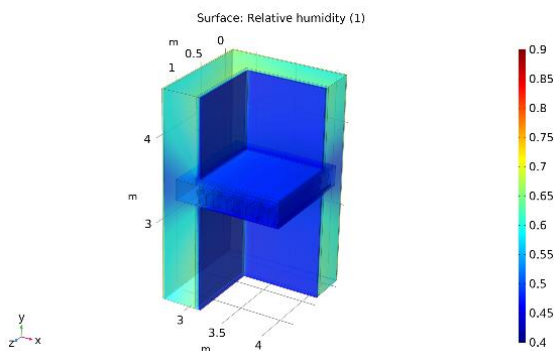
A felújított rétegrendű Bohn-födém higrotermikus szimulációjához tartozó eredményábrák a 83-86. ábrákon kerülnek bemutatásra:



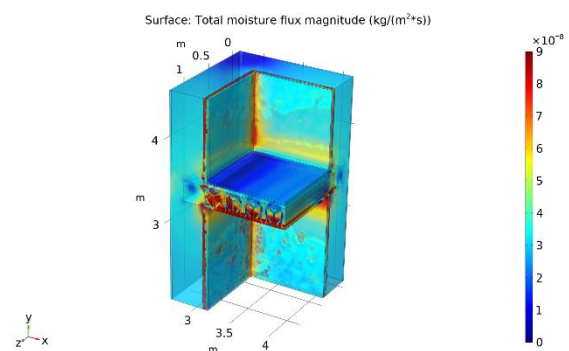
83. ábra: Felújított Bohn-födém hőmérséklet eloszlás ábrája



84. ábra: Felújított Bohn-födém hőáram sűrűség ábrája



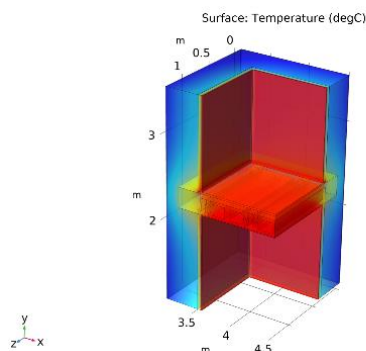
85. ábra: Felújított Bohn-födém nedvességtartalom ábrája



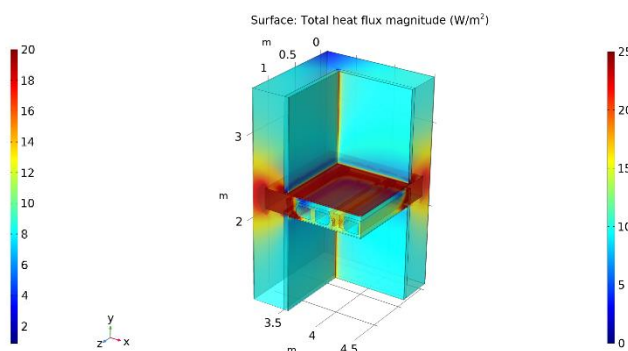
86. ábra: Felújított Bohn-födém nedvességáram sűrűség ábrája

– E-gerendás födém

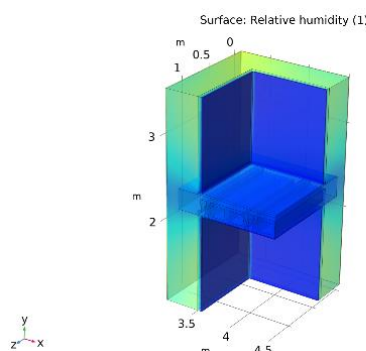
A felújított rétegrendű E-gerendás födém higrotermikus szimulációjához tartozó eredményábrák a 87-90. ábrákon kerülnek bemutatásra:



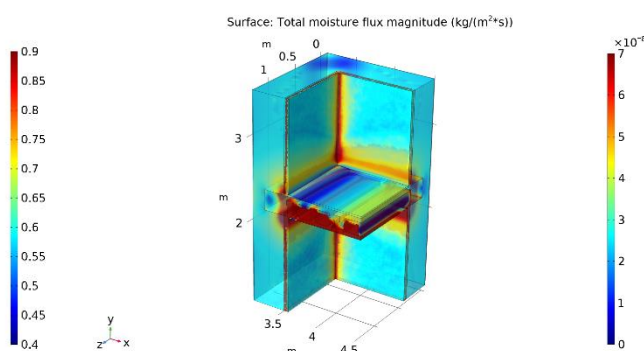
87. ábra: Felújított E-gerendás födém hőmérséklet eloszlás ábrája



88. ábra: Felújított E-gerendás födém hőáram sűrűség ábrája



89. ábra: Felújított E-gerendás födém nedvességtartalom ábrája

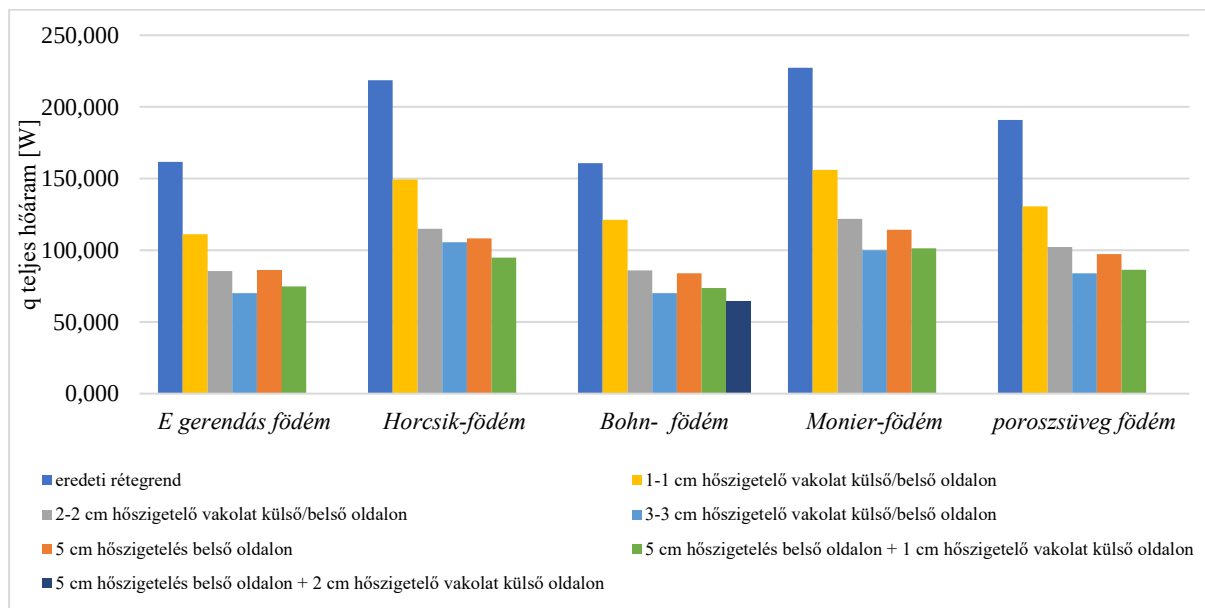


90. ábra: Felújított E-gerendás födém nedvességáram sűrűség ábrája

9.3. Eredmények kiértékelése

– teljes hőáramok és 3D-s csomóponti hőátbocsátási tényezők összehasonlítása

q teljes hőáram [w]	E gerendás födém	Horcsik-födém	Bohn-födém	Monier-födém	poroszüveg födém
eredeti rétegrend	161,580	218,590	160,770	227,360	190,840
1-1 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	111,260	149,320	121,250	156,000	130,670
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	68,86%	68,31%	75,42%	68,61%	68,47%
2-2 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	85,484	114,950	85,955	121,930	102,230
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	52,91%	52,59%	53,46%	53,63%	53,57%
3-3 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	70,071	105,720	70,041	100,070	83,906
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	43,37%	48,36%	43,57%	44,01%	43,97%
5 cm hőszigetelés belső oldalon	86,231	108,240	83,849	114,210	97,246
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	53,37%	49,52%	52,15%	50,23%	50,96%
5 cm hőszigetelés belső oldalon + 1 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon	74,894	94,790	73,715	101,320	86,380
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	46,35%	43,36%	45,85%	44,56%	45,26%
5 cm hőszigetelés belső oldalon + 2 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon	-	-	64,633	-	-
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	-	-	40,20%	-	-

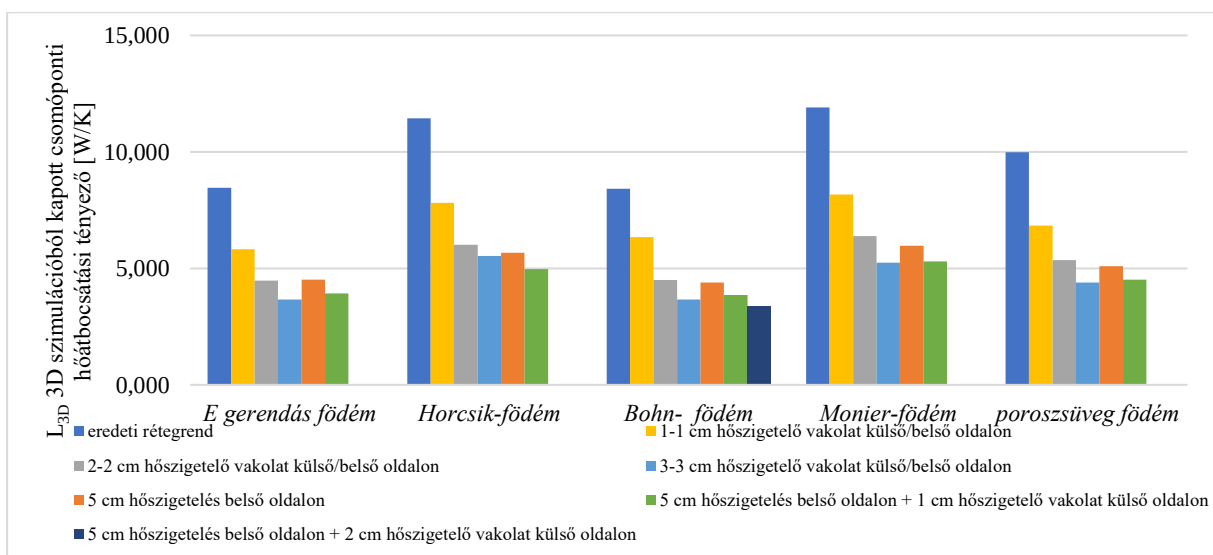


91. ábra: Teljes hőáramok összehasonlítása egyes földemtípusok felújítási változatainál

Megvizsgálva a csomópontoknál keletkező hőáramokat látható, hogy minden felújítási változat esetében csökkenés tapasztalható. Minél vastagabb hőszigetelő vakolatot alkalmazunk annál nagyobb csökkenés tapasztalható. A Horcsik-földem esetét leszámítva azt is láthatjuk, hogy 3 cm hőszigetelő vakolat nagyobb mértékben csökkenti a hőáramok nagyságát, mint ha belülré 5 cm hőszigetelést is felhelyeznénk. A legnagyobb csökkenés a csak a Bohn-földemre vizsgált 5 cm belső hőszigetelés és 2 cm külső oldalra felhelyezett hőszigetelő vakolat esetében tapasztalható, ekkor az eredeti kialakításnál keletkező hőáram csak 40%-a jelentkezik. Ezek alapján elmondható, hogy mindegyik felújítási opcióval jelentősen, akár 25-60%-kal csökkenthető a csomóponti hőveszteség. Az eredmények azt is mutatják, hogy amennyiben csak belső oldali hőszigetelést alkalmazunk, úgy kevésbé csökken a kialakuló hőáramok nagysága, mint ha a külső oldalon hőszigetelő vakolatot is felhelyezünk. Ez többek között azzal indokolható, hogy a hőszigeteléssel csak a belső oldalon csökkentjük a kialakuló hőáramok sűrűségét, a földem-fal csatlakozás mentén ugyanúgy hőhidak alakulhatnak ki. Míg ezzel szemben, ha a külső oldalon is viszonylag alacsony hővezetési tényezőjű hőszigetelő vakolattal zárjuk le a felületet, úgy a külső oldalról is gátoljuk a hőáramok kialakulását és kisebb hőveszteségek keletkeznek. Ebből adódóan a legjobb megoldás, ha lehetőségünk van mind a külső, mind a belső oldalon csökkenteni a kialakuló hőáramok nagyságát, tehát vagy belső oldali hőszigetelést külső oldali hőszigetelő vakolattal alkalmazunk, vagy amennyiben nem műemlékvédelmi épületről beszélünk, úgy külső oldali hőszigetelést is alkalmazhatunk. Mivel

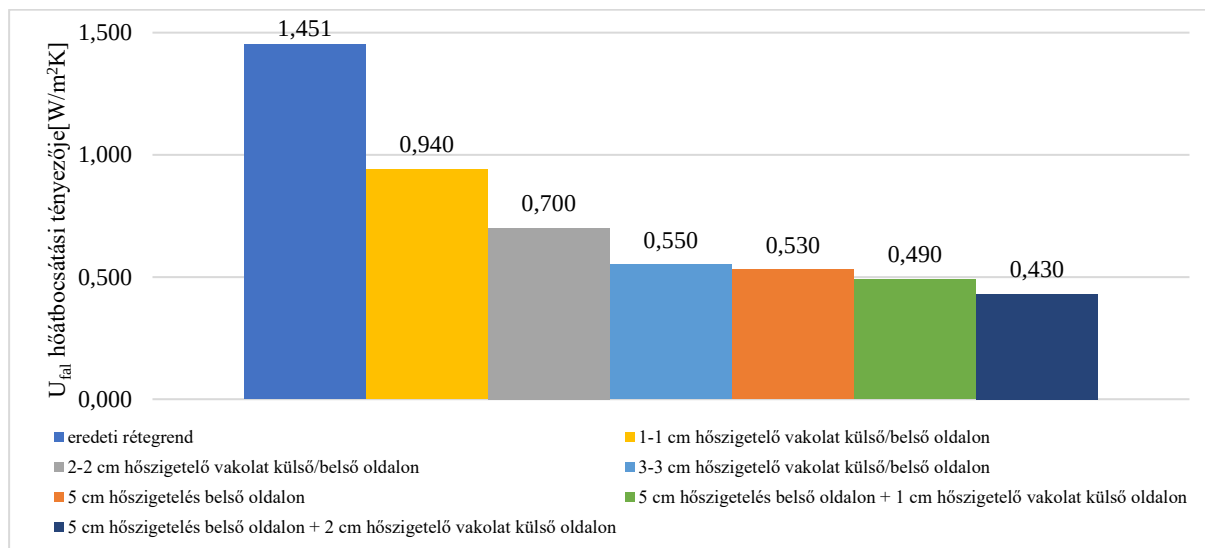
a 3D-s szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező a teljes hőáram és a hőmérsékletkülönbség hányadosából adódik, így ebben az esetben is hasonló csökkenésekről beszélhetünk, amely eredmények a 92. ábrán láthatók:

L _{3D} 3D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező [W/K]	E gerendás födém	Horcsik- födém	Bohn- födém	Monier- födém	poroszsüveg födém
eredeti rétegrend	8,460	11,445	8,417	11,904	9,992
1-1 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	5,825	7,818	6,348	8,168	6,841
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	68,86%	68,31%	75,42%	68,61%	68,47%
2-2 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	4,476	6,018	4,500	6,384	5,352
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	52,91%	52,59%	53,46%	53,63%	53,57%
3-3 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	3,669	5,535	3,667	5,239	4,393
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	43,37%	48,36%	43,57%	44,01%	43,97%
5 cm hőszigetelés belső oldalon	4,515	5,667	4,390	5,980	5,091
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	53,37%	49,52%	52,15%	50,23%	50,96%
5 cm hőszigetelés belső oldalon + 1 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon	3,921	4,963	3,859	5,305	4,523
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	46,35%	43,36%	45,85%	44,56%	45,26%
5 cm hőszigetelés belső oldalon + 2 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon	-	-	3,384	-	-
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	-	-	40,20%	-	-



92. ábra: 3D-s csp-i hőátbocsátási tényezők összehasonlítása egyes födém típusok felújítási változatainál

U _{fal} fal hőátbocsátási tényezője [W/m ² K]	
eredeti rétegrend	1,451
1-1 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	0,940
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	64,78%
2-2 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	0,700
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	48,24%
3-3 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	0,550
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	37,90%
5 cm hőszigetelés belső oldalon	0,530
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	36,53%
5 cm hőszigetelés belső oldalon + 1 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon	0,490
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	33,77%
5 cm hőszigetelés belső oldalon + 2 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon	0,430
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	29,63%

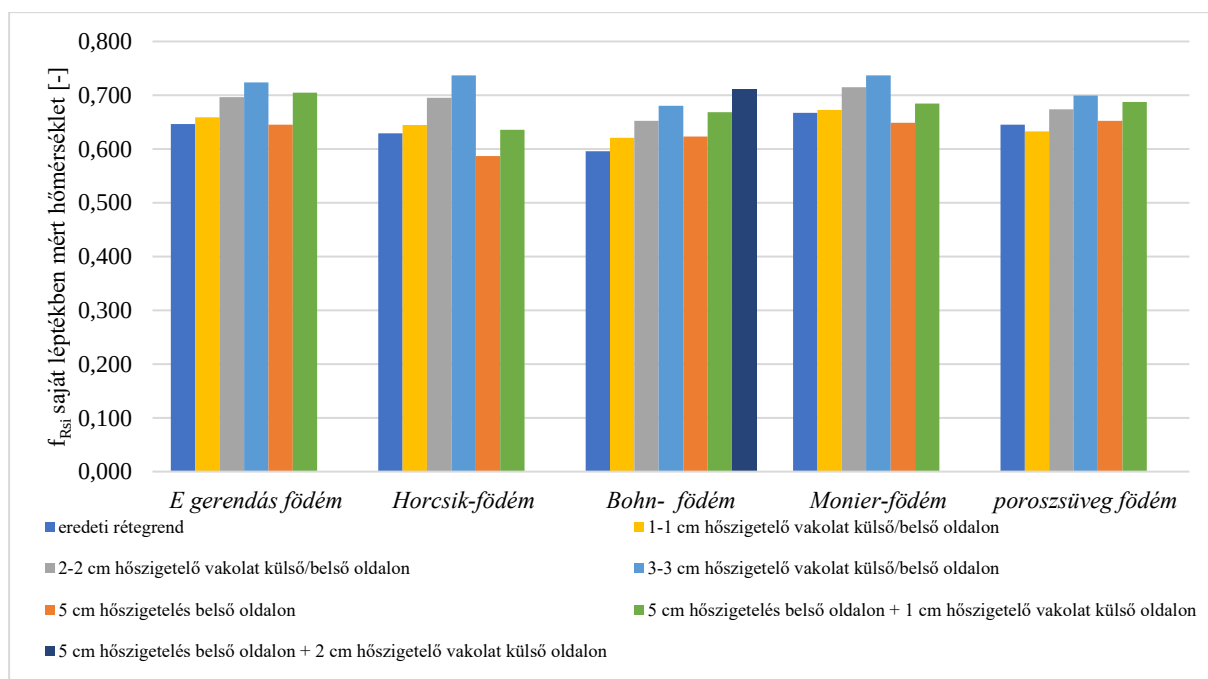


93. ábra: Fal hőátbocsátási tényezőjének összehasonlítása egyes felújítási változatok esetében

Ugyan a 7/2006 TNM rendelet [43] értelmében a falak hőátbocsátási tényezőjére vonatkozó követelményérték $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$, jelen diplomamunka keretében feltételezve, hogy a vizsgált épületek műemlékvédelem vagy helyi védelem alatt állnak, így ez a követelményérték rájuk nem vonatkozik. A diplomamunkámban a felújítási opciók kidolgozásának elsődleges célja az állagvédelmi megfeleltetés volt. Ennek ellenére igyekeztem olyan felújítási opciókat vizsgálni, amelyekkel jelentősen csökkenthető az eredeti fal rétegrend hőátbocsátási tényezője. A 93. ábrán látható eredmények alapján elmondható, hogy már 1-1 cm külső és belső oldalon elhelyezett hőszigetelő vakolat is jelentősen, akár 35%-kal képes csökkenteni a fal hőátbocsátási tényezőjét. A legnagyobb csökkenést természetesen azzal érhetjük el, ha mind a belső, mind a külső oldalt valamilyen módon hőszigeteljük, jelen esetben 5 cm belső oldali hőszigeteléssel és 2 cm vastag hőszigetelő vakolattal több, mint 70%-os csökkenést érhetünk el. Amennyiben nem műemléki épületről beszélünk és meg kell felelni a rendeletben előírt energetikai követelményeknek és csak belső oldali hőszigetelésre van lehetőségünk, úgy minimum 15 cm Multipor hőszigetelést kellene alkalmazni ahhoz, hogy a hőátbocsátási tényező $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ -re adódjon. Mivel 15 cm belső oldali hőszigetelés felhelyezése komoly alaprajzi veszteségekkel jár, így ennél jobb megoldás lehet amennyiben lehetőségünk van rá a külső oldalra hőszigetelő vakolatot is elhelyezni. Ebben az esetben 12 cm belső oldali hőszigetelésre és 3 cm külső oldali hőszigetelő vakolatra van szükség a követelményértékek teljesítéséhez. Annak eldöntéséhez, hogy melyik felújítási opció a legoptimálisabb választás adott épület esetében egyéb gazdasági és kivitelezési szempontokat is figyelembe kell venni.

– saját léptékben mért hőmérsékletek összehasonlítása

f_{Rsi} saját léptékben mért hőmérséklet [-]	E gerendás födém	Horcsik- födém	Bohn- födém	Monier- födém	poroszsüveg födém
eredeti rétegrend	0,646	0,629	0,596	0,667	0,645
1-1 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	0,659	0,645	0,621	0,673	0,633
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	101,94%	102,48%	104,21%	100,86%	98,07%
2-2 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	0,697	0,695	0,652	0,715	0,674
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	107,76%	110,57%	109,46%	107,16%	104,43%
3-3 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	0,724	0,737	0,680	0,737	0,700
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	112,02%	117,15%	114,19%	110,44%	108,47%
5 cm hőszigetelés belső oldalon	0,645	0,587	0,623	0,649	0,652
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	99,85%	93,32%	104,58%	97,25%	101,14%
5 cm hőszigetelés belső oldalon + 1 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon	0,705	0,636	0,668	0,685	0,688
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	109,02%	101,09%	112,13%	102,63%	106,61%
5 cm hőszigetelés belső oldalon + 2 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon	-	-	0,712	-	-
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	-	-	119,48%	-	-



94. ábra: Saját léptékben mért hőmérsékletek összehasonlítása egyes födém típusok felújítási változatainál

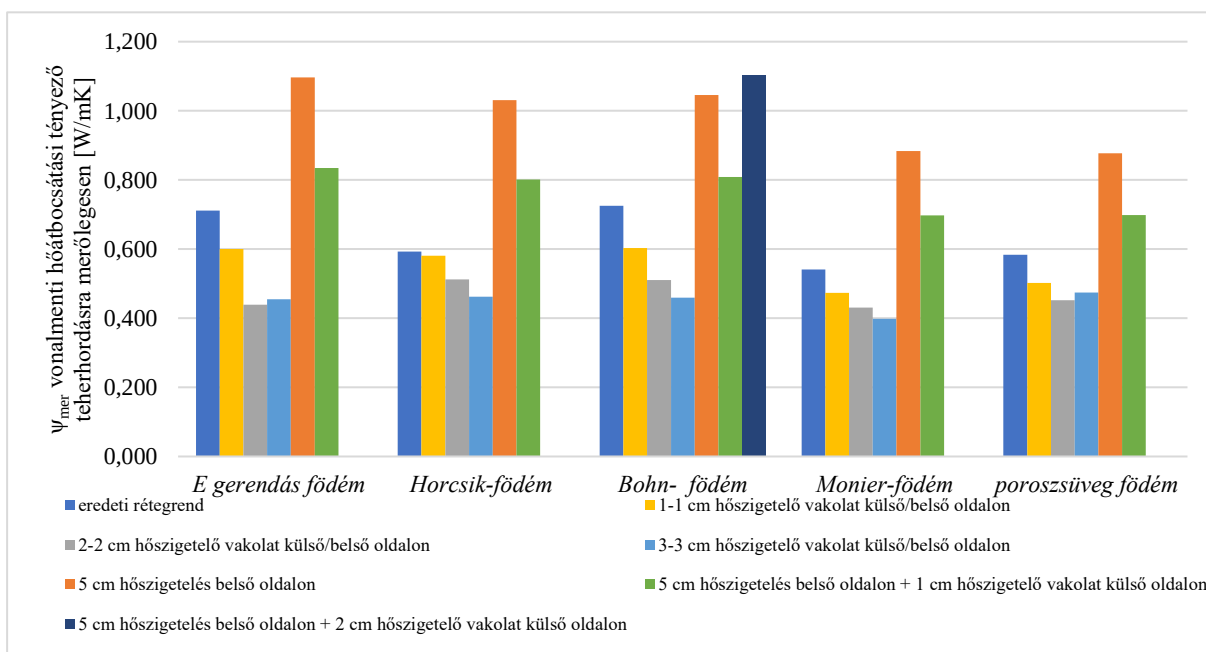
A 7.2 fejezet alapján állagvédelmileg megfelelő kialakításról beszélhetünk, amennyiben a csomópontok saját léptékben mért hőmérséklete meghaladja a 0,7-es (szigorúbb értelmezés alapján 0,8-as) követelményértéket. Mivel jelen dolgozatban a célom az állagvédelmi megfeleltetés volt, így minden födémeket addig vizsgáltam, amíg adott kialakítás meg nem felelt a 0,7-es követelménynek. Az így kiválasztott és kidolgozásra kerülő felújítási változatokat a 9.2 fejezet tartalmazza. A 94. ábrán látható eredmények azt mutatják, hogy minden felújítási változat esetében magasabb belső felületi hőmérsékletek adódtak a csomóponton belül, így a saját léptékben mért hőmérséklet is növekedett. Ebben az esetben is észrevehető hasonló

módon, mint a hőáramoknál, hogy nagyobb mértékben nőtt a belső felületi hőmérséklet azokban az esetekben, amikor mind a belső mind a külső oldalon valamilyen hőszigetelést helyeztünk el.

– vonalmenti hőátbocsátási tényezők összehasonlítása

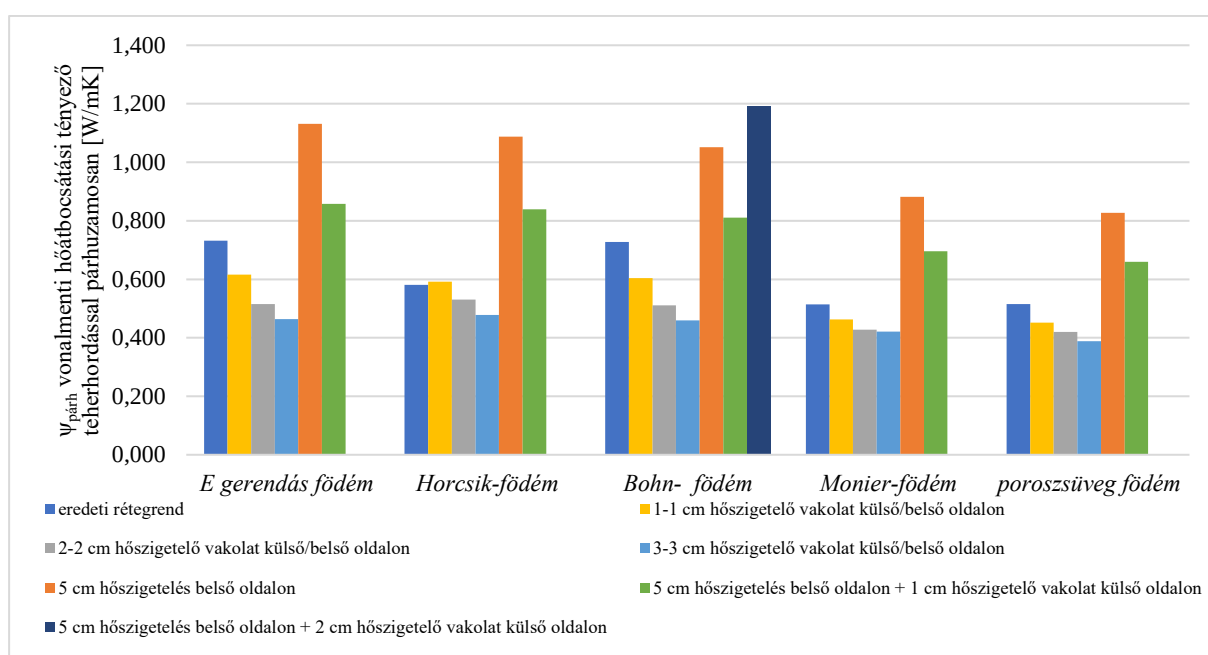
A vonalmenti hőátbocsátási tényezők esetében jelen fejezetben csak a teherhordási iránnyal párhuzamos és merőleges esetekben készítettem el a kiértékelést, a falsarok csomópont eredményei a 9.3 fejezetben szerepelnek. Mivel a falsarok csomópontok csak geometriai méretükben különböznek egymástól, így az eredmények közt számottevő különbség nincs.

Ψ_{mer} vonalmenti hőátbocsátási tényező teherhordásra merőlegesen [W/mK]	E gerendás födém	Horcsik- födém	Bohn- födém	Monier- födém	poroszsüveg födém
eredeti rétegrend	0,711	0,593	0,725	0,541	0,584
1-1 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	0,600	0,580	0,603	0,473	0,502
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	84,34%	97,90%	83,10%	87,50%	86,06%
2-2 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	0,439	0,512	0,511	0,431	0,452
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	61,74%	86,39%	70,43%	79,63%	77,49%
3-3 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	0,454	0,462	0,460	0,398	0,474
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	63,90%	77,90%	63,40%	73,62%	81,16%
5 cm hőszigetelés belső oldalon	1,097	1,031	1,045	0,884	0,877
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	154,22%	173,91%	144,16%	163,41%	150,28%
5 cm hőszigetelés belső oldalon + 1 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon	0,835	0,801	0,808	0,697	0,698
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	117,36%	135,07%	111,47%	128,92%	119,63%
5 cm hőszigetelés belső oldalon + 2 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon	-	-	1,102	-	-
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	-	-	151,97%	-	-



95. ábra: Vonalmenti hőátbocsátási tényezők összehasonlítása teherhordási irányra merőlegesen egyes födém típusok felújítási változatainál

$\Psi_{\text{párh}}$ vonalmenti hőátbocsátási tényező teherhordásra merőlegesen [W/mK]	E gerendás födém	Horcsik- födém	Bohn- födém	Monier- födém	poroszsüveg födém
eredeti rétegrend	0,732	0,580	0,728	0,514	0,515
1-1 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	0,616	0,592	0,603	0,463	0,452
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	84,11%	101,98%	82,90%	90,08%	87,66%
2-2 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	0,515	0,530	0,511	0,427	0,420
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	70,36%	91,37%	70,18%	83,10%	81,55%
3-3 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon	0,464	0,478	0,460	0,421	0,389
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	63,31%	82,38%	63,13%	81,88%	75,41%
5 cm hőszigetelés belső oldalon	1,132	1,087	1,052	0,882	0,827
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	154,58%	187,35%	144,51%	171,49%	160,47%
5 cm hőszigetelés belső oldalon + 1 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon	0,857	0,839	0,811	0,696	0,660
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	117,08%	144,57%	111,44%	135,40%	128,05%
5 cm hőszigetelés belső oldalon + 2 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon	-	-	1,191	-	-
eltérés az eredeti rétegrendtől [%]	-	-	163,62%	-	-



96. ábra: Vonalmenti hőátbocsátási tényezők összehasonlítása teherhordási iránnyal párhuzamosan egyes födém típusok felújítási változatainál

A 95. és 96. ábrán látható eredmények alapján elmondható, hogy mind a két teherhordási irányban hasonló trendet követnek az eredmények, tehát a vonalmenti hőátbocsátási tényező nem függ jelentősen az iránytól. Míg a hőszigetelő vakolat már 1 cm vastagságban jelentősen csökkenti a vonalmenti hőhidak nagyságát, addig a belső oldali hőszigetelés alkalmazása az eredeti rétegrendi kialakításnál is nagyobb vonalmenti hőátbocsátási tényezőket eredményez. Ezek az eredmények is azt mutatják, amit a 8.4 fejezetben kifejtettem, hogy jelen csomóponti kialakításoknál a hőveszteségek/hőhidak nem a falsarok csomópontban, hanem a fal-födém vonalmenti csatlakozásai mentén, főleg a födém alsó síkján keletkeznek. Ezek a hőhidak a Comsol Multiphysics szoftverből lekért eredményábrákon is jól láthatók. A vonalmenti hőátbocsátási tényezők csökkentéséhez tehát szükség lenne a fal belső oldali hőszigetelésén

kívül a födémek alsó síkjának megfelelő szigetelésére is, ezzel csökkentve a fal-födém csatlakozások mentén a vonalmenti hőhidak nagyságát.

9.4. Csomóponti részletrajzok

Az egyes födémekre kiválasztott felújítási opciók csomóponti részleteinek kidolgozása a diplomamunka mellékletében található.

10.Összefoglalás

Dolgozatomban Comsol Multiphysics 5.6 végeselemes numerikus multifizikai szoftver segítségével végeztem hőtechnikai és higrotermikus szimulációkat a Magyarországon leginkább elterjedt 5 hagyományos fűdétípus fal-fűdém csomópontjaira, majd a szimulációs eredmények alapján meghatároztam a csomópontok többlet hőveszteségeit. Erre azért van nagy szükség, mert az építőiparban és az örökségvédelemben egyre nagyobb az igény olyan számítási módszerekre, amelyek képesek megbecsülni az épületek hosszútávú hő-és nedvességtechnikai viselkedését. Erre egy jó megoldás lehet a csomóponti kialakítások higrotermikus szimulációja, azonban alkalmazása még nem széles körben elterjedt a szakmában.

A dolgozatomban született eredmények alátámasztják a kapcsolt hő-és nedvességtranszport szükségességét, hiszen látható, hogy sokkal pontosabb és részletesebb eredmény születtek, mint csak hőtechnikai szimulációk alkalmazásakor. Jellemzően olyan csomóponti kialakításakor lehet különösen fontos a higrotermikus szimulációk alkalmazása, amelyeknél sok különböző hőtechnikai tulajdonságú anyag található, valamint ahol ezek az anyagok nedvességre érzékenyek, ilyenkor az eredmények pontossága nagyban függ a bemenő adatok pontosságától is. A szimulációk eredményei alapján elmondható, hogy egyik történeti fűdém szerkezet kialakítása sem elégíti ki a ma érvényben lévő energetikai és állagvédelmi minimum követelményeket, emiatt felújításra szorulnak. A higrotermikus szimulációk alapján a Bohn-fűdém esetében kaptuk a legalacsonyabb saját léptékben mért hőmérsékletet, ami még a 0,6-os értéket sem érte el, így ennél a fűdétípusnál 5 cm vastag belső hőszigetelésre és 3-3 cm hőszigetelő vakolatra volt szükség. Ennek eredményeképpen javult a saját léptékben mért hőmérséklet értéke, elérte a 0,7-es minimum követelményt, ami állagvédelmileg már megfelelőnek mondható. A legjobban teljesítő történeti fűdém szerkezet a Monier-fűdém volt, amely eredeti rétegrendi kialakítása során kapott saját léptékben mért hőmérséklete is majdnem elérte a 0,7-es követelményt, így ebben az esetben elegendő volt 2-2 cm hőszigetelő vakolat elhelyezése a külső és belső oldalon, ahhoz, hogy állagvédelmileg megfelelő kialakítást kapjunk. Alapvetően elmondható a történeti fűdém szerkezetek rétegrendjeiről, hogy mindegyik esetben nagy hőveszteségekről és hőhidakról beszélhetünk, azonban jellemzően ezek nem a falsarok csomópontnál, hanem a fal-fűdém hosszmenti csatlakozások mentén alakulnak ki. Ez többek között annak köszönhető, hogy 100-150 évvel ezelőtt, amikor a legtöbb hasonló

födémszerkezet készült, még nem foglalkoztak az állagvédelmileg és hőtechnikailag megfelelő kialakítással, még nem léteztek olyan anyagok, például hőszigetelések, amik hatékonyan tudták volna csökkenteni a hőveszteségeket, valamint rengeteg esetben még az anyagtulajdonságok ismerete is bizonytalan.

Fontos kiemelni, hogy a szimulációk során az anyagtulajdonságok meghatározásakor osztrák adatbázist alkalmaztam, emiatt további kutatási lehetőség lehet magyarországi specifikus anyagtulajdonságok vizsgálata, valamint az anyagtulajdonságok laboratóriumi mérések során való meghatározása. A modellek pontosításával, a bemenő fizika bővítésével, mint például az üreges födémek esetében a légáramlás figyelembevételével, valamint több födém típus vizsgálatával még átfogóbb és egzaktabb eredmények kaphatók. A többlet hőveszteségek, valamint a saját léptékben mért hőmérsékletek minél pontosabb becslése nagyon fontos tényező az állagvédelmi vizsgálatoknál, valamint a felújítási változatok megtervezésénél. Ez nagy segítség lehet hazai viszonylatban, ugyanis főleg a budapesti, valamint a nagyvárosi épületállomány jelentős része a kutatásban is szereplő födém típusokból készült, amelyek már sok esetben 100-150 évesek és felújításra szorulnak. Ezért az MSc diplomamunkámban az egyes födém típusokra kidolgozott felújítási opciók hasznosak lehetnek a gyakorlatban is, hiszen pontosabb képet kaphatunk arról, hogy milyen rétegrendi kialakításokat lehet érdemes használni ezen típusú födémekkel kialakított épületek esetében.

11. Irodalomjegyzék

- [1] L. Széll, *Magasépítéstan I.* Tankönyvkiadó, 1978.
- [2] A. Déry, *Öt könyv a régi építészetéről, 1-5. kötet.* Terc Kft, 2010.
- [3] Á. Pattantyús-Ábrahám, *Épületrehabilitáció, Tartószerkezetek helyreállítása, átépítése és megerősítése.* Terc Kft, 2013.
- [4] L. V. Teesdale, “Condensation in Walls and Attics,” *Am. Build. Build. Age*, p. 12, 1937.
- [5] H. Glaser, “Wärmeleitung und Feuchtigkeitsdurchgang durch Kühlraumisolierungen,” *Kältetechnik*, vol. 10, no. 3, pp. 86–91, 1958.
- [6] J. R. Philip and D. A. De Vries, “Moisture movement in porous materials under temperature gradients,” *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 38, no. 2, pp. 222–232, 1957.
- [7] C. Rode, “Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions,” Technical University of Denmark (DTU), 1990.
- [8] H. M. Künzeli, “Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One- and two-dimensional calculation using simple parameters,” 1995.
- [9] J. Grunewald, “Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energie- transport in kapillarporösen Baustoffen,” Technische Universität Dresden, 1996.
- [10] C.-E. Hagendoft and T. Bomberg, “1D-HAM Coupled Heat, Air and Moisture A.XXI Transport in Multi-layered Wall Structures,” 2000.
- [11] M. H. de Wit, “Heat, air and moisture in building envelopes,” 2009.
- [12] A. W. M. Van Schnijndel, “Integrated Heat Air and Moisture Modeling and Simulation,” Eindhoven University of Technology,” 2007.
- [13] H. L. S. C. Hens, “Combined heat, air, moisture modelling: A look back, how, of help?,” *Build. Environ.*, vol. 91, pp. 138–151, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2015.03.009.
- [14] B. Nagy, “Hygrothermal Behavior of Modern Masonry Building Constructions,” 2019.
- [15] L. Wang and H. Ge, “Effect of air leakage on the hygrothermal performance of highly insulated wood frame walls: Comparison of air leakage modelling methods,” *Build. Environ.*, vol. 123, pp. 363–377, 2017.

- [16] B. Nagy and E. Tóth, “Hygrothermal behaviour of hollow and filled ceramic masonry blocks,” *Int. RILEM Conf. Mater. Syst. Struct. Civ. Eng.* 2016, vol. 112, pp. 279–288, 2016.
- [17] J. Sýkora, M. Šejnoha, and J. Šejnoha, “Homogenization of coupled heat and moisture transport in masonry structures including interfaces,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 219, no. 13, pp. 7275–7285, 2013.
- [18] J. Sýkora, J. Vorel, T. Krejčí, M. Šejnoha, and J. Šejnoha, “Analysis of coupled heat and moisture transfer in masonry structures0,” *Mater. Struct.*, vol. 42, no. 8, pp. 1153–1167, 2009.
- [19] P. Pihelo, M. Lelumees, and T. Kalamees, “Influence of Moisture Dry-out on Hygrothermal Performance of Prefabricated Modular Renovation Elements,” *Energy Procedia*, vol. 96, pp. 745–755, 2016.
- [20] M. Ibrahim, E. Wurtz, P. H. Biwolé, P. Achard, and H. Sallee, “Hygrothermal performance of exterior walls covered with aerogel-based insulating rendering,” *Energy Build.*, vol. 132, pp. 241–251, 2014.
- [21] T. Colinart, D. Lelievre, and P. Glouannec, ““Experimental and numerical analysis of the transient hygrothermal behavior of multilayered hemp concrete wall,” *Energy Build.*, vol. 112, pp. 1–11, 2016.
- [22] R. McClung, H. Ge, J. Straube, and J. Wang, “Hygrothermal performance of crosslaminated timber wall assemblies with built-in moisture: field measurements and simulations,” *Energy Build.*, vol. 71, pp. 95–110, 2014.
- [23] P. Pihelo, H. Kikkas, and T. Kalamees, “Hygrothermal Performance of Highly Insulated Timber-frame External Wall,” *Energy Procedia*, vol. 96, pp. 685–695, 2016.
- [24] V. Vitiello, R. Castelluccio, and M. Del Rio Merino, “Experimental research to evaluate the percentage change of thermal and mechanical performances of bricks in historical buildings due to moisture,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 244, May 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118107.
- [25] P. Šťastný, J. Gašparík, and O. Makýš, “Analysis of moisture and salinity of historical constructions before and after the application of REMEDIATIONS,” *J. Build. Eng.*, vol. 41, p. 102785, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.102785.
- [26] V. Cabrera, R. López-Vizcaíno, Á. Yustres, M. Á. Ruiz, E. Torrero, and V. Navarro, “A

- functional structure for state functions of moisture transfer in heritage building elements,” *J. Build. Eng.*, vol. 29, p. 101201, May 2020, doi: 10.1016/J.JOBE.2020.101201.
- [27] K. Abahri, R. Belarbi, and A. Trabelsi, “Contribution to analytical and numerical study of combined heat and moisture transfers in porous building materials,” *Build. Environ.*, vol. 46, no. 7, pp. 1354–1360, Jul. 2011, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2010.12.020.
- [28] M. Bianchi Janetti, F. Ochs, and R. Pfluger, “Coupling Forced Convection in Air Gaps with Heat and Moisture Transfer inside Constructions.”
- [29] M. Bianchi Janetti, F. Ochs, and W. Feist, “3D Simulation of Heat and Moisture Diffusion in Constructions.”
- [30] B. Nagy and C. Tömböly, “Hygrothermal Analysis of Window Construcion Joints,” *Zb. Rad. Građevinskog Fak.*, vol. 34, pp. 91–100, 2018.
- [31] B. Nagy, “Designing insulation filled masonry blocks against hygrothermal deterioration,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 103, pp. 144–157, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.05.005.
- [32] Magyar Szabvány, “MSZ EN 24140:2015, Épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai,” 2015.
- [33] Hungarian Standard Institute, “MSZ EN ISO 13788 Épületszerkezetek és épületelemek hő- és nedvességtechnikai viselkedése. A kritikus felületi nedvességet és a szerkezeten belüli páralecsapódást megelőző belső felületi hőmérséklet. Számítási módszerek.”.
- [34] Hungarian Standard Institute, “MSZ EN 15026:2007, Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation,” 2007.
- [35] COMSOL, “Comsol Multiphysics 5.6 [computer program].” Accessed: Sep. 01, 2021. [Online]. Available: Comsol Multiphysics 5.6 [computer program].
- [36] B. Nagy and E. Paulik, “Vasbeton szerkezetek hővezetési tulajdonságai,” *Műszaki Ellenőr Mag.*, 2016.
- [37] MSZ EN ISO 10211:2017, “Hőhidak az épületszerkezetekben. Hőáramok és felületi hőmérsékletek. Részletes számítások,” *Hungarian Stand. Inst.*, 2019.
- [38] MSZ EN ISO 10456:2008, “Építési anyagok és termékek. Hő- és nedvességtechnikai

- tulajdonságok. Táblázatos tervezési értékek, illetve eljárások a közölt és tervezési hőtechnikai értékek meghatározására (ISO 10456:2007),” *Hungarian Stand. Inst.*, 2008.
- [39] Fraunhofer IBP, “WUFI PRO 6.6 [computer program].” Accessed: Oct. 24, 2022. [Online]. Available: <https://wufi.de/en/2022/06/29/release-wufi-pro-6-6-and-wufi-2d-4-4/>.
- [40] H. Künzle (Fraunhofer IBP) *et al.*, “prEN 15026:2007, Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation.” 2022.
- [41] ComsolMultiphysics, “Heat Transfer Module,” *Manual*. pp. 1–222, 2015.
- [42] M. H. Spitzner, “Neue DIN 4108-2 – „Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“, Änderungen beim Anwendungsbereich, Mindestwärmeschutz und Wärmebrücken ,” 2013.
- [43] MAGYAR JOGSZABÁLY TÁR, “7/2006 TNM Rendelet,” no. 3, 2020.
- [44] “Multipor hőszigetelés adatlap [weboldal],” 2022. https://www.xella.hu/hu_HU/Multipor-hoszigeteles.
- [45] “SAKRET Premium WDP 055 adatlap [weboldal].” https://www.sakret.de/de/produkt/PRO_WEB/Unter_Normalputze/WDP_055/-28f3c155fc520212.



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki-és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Építőanyagok- és Magasépítés Tanszék

MSc Diplomamunka

Melléklet

Készítette:

Petresevic Fanni, LM25TC, MSc hallgató

Budapest, 2022.12.16.

1. Táblázatjegyzék

1. TÁBLÁZAT: A SZIMULÁCIÓK EREDMÉNYEI ÉS A SZÁMÍTÁSOKHOZ SZÜKSÉGES GEOMETRIAI MODELLEKBŐL LEKÉRT HOSSZAK ÉS FELÜLETEK	6
2. TÁBLÁZAT: FELÚJÍTÁSI VÁLTOZATOK HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓJÁNAK EREDMÉNYEI.....	7
3. TÁBLÁZAT: FELÚJÍTÁSI VÁLTOZATOK HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓJÁNAK EREDMÉNYEI.....	8
4. TÁBLÁZAT: FELÚJÍTÁSI VÁLTOZATOK HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓJÁNAK EREDMÉNYEI.....	9

Ábrajegyzék

1. ÁBRA: 1 MÉTER MAGAS FAL HŐÁRAMSŰRŰSÉG ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL	10
2. ÁBRA: 1 M MAGAS FAL HŐÁRAMSŰRŰSÉG ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL	10
3. ÁBRA: 1 MÉTER MAGAS FAL HŐÁRAMSŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL	11
4. ÁBRA: 1 MÉTER MAGAS FAL HŐÁRAMSŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL	11
5. ÁBRA: 1 MÉTER MAGAS FAL RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL	12
6. ÁBRA: 1 MÉTER MAGAS FAL NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL	12
7. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL	13
8. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐÁRAMSŰRŰSÉG ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL	13
9. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL	14
10. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL	14
11. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	15
12. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	15
13. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	16
14. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	16
15. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	17
16. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	17
17. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	18
18. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	18

19. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL	19
20. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐÁRAMSŰRŰSÉG ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL	19
21. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL	20
22. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL	20
23. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL	21
24. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS	
SZIMULÁCIÓBÓL.....	21
25. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	22
26. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	22
27. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	23
28. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS	
SZIMULÁCIÓBÓL.....	23
29. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	24
30. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	24
31. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL	25
32. ÁBRA: HORCSIK -FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐÁRAMSŰRŰSÉG ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL	25
33. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL	26
34. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL	26
35. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL	27
36. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS	
SZIMULÁCIÓBÓL.....	27
37. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	28
38. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	28

39. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	29
40. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS	
SZIMULÁCIÓBÓL.....	29
41. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	30
42. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	30
43. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL.....	31
44. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐÁRAMSŰRŰSÉG ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL.....	31
45. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI	
SZIMULÁCIÓBÓL.....	32
46. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI	
SZIMULÁCIÓBÓL.....	32
47. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	33
48. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS	
SZIMULÁCIÓBÓL.....	33
49. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	34
50. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	34
51. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	35
52. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS	
SZIMULÁCIÓBÓL.....	35
53. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	36
54. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	36
55. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL.....	37
56. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐÁRAMSŰRŰSÉG ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL.....	37
57. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓBÓL.....	38
58. ÁBRA: E-GERENDÁS TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI	
SZIMULÁCIÓBÓL.....	38

59. ÁBRA: E-GERENDÁS TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL	39
60. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	39
61. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	40
62. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	40
63. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL PÁRHUZAMOS IRÁNYÚ HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	41
64. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	41
65. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	42
66. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM TEHERHORDÁSSAL MERŐLEGES IRÁNYÚ NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA	
HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓBÓL.....	42

		Hőtechnikai szimuláció					Higrotermikus szimuláció				
		E gerendás fűdém	Horsik- fűdém	Bohn- fűdém	Monier- fűdém	poroszüveg fűdém	E gerendás fűdém	Horsik- fűdém	Bohn- fűdém	Monier- fűdém	poroszüveg fűdém
teljes hőáram	$Q_{össz}$ [W]	200,820	281,060	198,850	288,880	242,850	161,580	218,590	160,770	227,910	190,840
hőáram teherhordással mérőlegesen	$Q_{párh}$ [W]	90,747	165,720	92,313	184,790	144,390	72,330	126,950	74,087	145,230	113,400
hőáram teherhordással párhuzamosan	Q_{mer} [W]	95,008	90,531	92,112	89,956	85,428	75,745	70,682	74,140	70,250	66,256
fal hőáram	Q_{fal} [W]	78,199	106,610	95,821	116,060	98,413	60,510	82,409	74,093	89,685	76,090
fal hőátbocsátási tényezője	U_{fal} [W/m ² K]	1,439	1,439	1,439	1,439	1,439	1,451	1,451	1,451	1,451	1,451
hőmérsékletkülönbség	dT [degC]	25	25	25	25	25	19,100	19,100	19,100	19,100	19,100
minimum hőmérséklet	T_{min} [degC]	9,373	5,790	8,603	10,653	9,916	13,246	12,912	12,282	16,537	13,221
teljes belső felület	$A_{belső}$ [m ²]	5,267	9,521	6,304	10,697	8,513	5,267	9,521	6,304	10,697	8,513
teljes fal felület	A_{teljes} [m ²]	4,316	5,977	4,324	6,633	5,474	4,316	5,977	4,324	6,633	5,474
fal felület teherhordással párhuzamosan felül	$A_{párhf}$ [m ²]	1,073	0,900	0,923	0,960	1,075	1,073	0,900	0,923	0,960	1,075
fal felület teherhordással párhuzamosan alul	$A_{párha}$ [m ²]	1,133	1,250	1,250	1,210	0,976	1,133	1,250	1,250	1,210	0,976
fal felület teherhordással mérőlegesen felül	A_{merf} [m ²]	1,041	1,611	0,923	1,991	1,817	1,041	1,611	0,923	1,991	1,817
fal felület teherhordással mérőlegesen alul	A_{mera} [m ²]	1,070	2,238	1,250	2,484	1,649	1,070	2,238	1,250	2,484	1,649
fal felület 1m-es sávban balra	A_{falb} [m ²]	0,990	0,990	1,000	0,990	0,946	0,990	0,990	1,000	0,990	0,946
fal felület 1m-es sávban jobbra	A_{falj} [m ²]	1,000	1,790	1,490	2,053	1,606	1,000	1,790	1,490	2,053	1,606
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan felül (fal-fal)	$l_{párhf}$ [m]	1,084	0,900	0,923	0,970	1,125	1,084	0,900	0,923	0,970	1,125
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan alul (fal-fal)	$l_{párha}$ [m]	1,144	1,250	1,250	1,210	1,021	1,144	1,250	1,250	1,210	1,021
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan párhuzamos (fal-fűdém)	$l_{párh p}$ [m]	1,000	1,000	1,000	1,000	0,956	1,000	1,000	1,000	1,000	0,956
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan mérőlegesen	$l_{párh m}$ [m]	0,960	1,790	1,000	2,053	1,606	0,960	1,790	1,000	2,053	1,606
csatlakozási hossz teherhordásra mérőlegesen felül (fal-fal)	l_{merf} [m]	1,084	0,900	0,923	0,970	1,125	1,084	0,900	0,923	0,970	1,125
csatlakozási hossz teherhordásra mérőlegesen alul (fal-fal)	l_{mera} [m]	1,144	1,250	1,250	1,210	1,021	1,144	1,250	1,250	1,210	1,021
csatlakozási hossz teherhordásra mérőlegesen párhuzamos	$l_{mer p}$ [m]	0,990	1,000	1,000	1,000	0,946	0,990	1,000	1,000	1,000	0,946
csatlakozási hossz teherhordásra mérőlegesen mérőleges (fal-fűdém)	$l_{mer m}$ [m]	0,960	1,790	1,000	2,053	1,606	0,960	1,790	1,000	2,053	1,606
csatlakozási hossz falcsatlakozás balra	l_{falb} [m]	1,000	0,990	1,000	1,000	0,946	1,000	0,990	1,000	1,000	0,946
csatlakozási hossz falcsatlakozás jobbra	l_{falj} [m]	1,000	1,790	1,490	2,053	1,606	1,000	1,790	1,490	2,053	1,606
csatlakozási hossz falcsatlakozás függőleges (fal-fal)	$l_{fal r}$ [m]	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

1. táblázat: A szimulációk eredményei és a számításokhoz szükséges geometriai modellekből lekért hosszak és felületek

		5 cm Multipor hőszigetelés belső oldalon					1-1 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon				
		E gerendás fűdém	Horsik- fűdém	Bohn- fűdém	Monier- fűdém	poroszsüveg fűdém	E gerendás fűdém	Horsik- fűdém	Bohn- fűdém	Monier- fűdém	poroszsüveg fűdém
teljes hőáram	$Q_{össz}$ [W]	86,231	108,240	83,849	114,210	97,246	111,260	149,320	121,250	156,000	130,670
hőáram teherhordással merőlegesen	$Q_{párh}$ [W]	41,762	74,209	41,965	79,934	61,785	49,399	88,939	50,524	98,883	77,261
hőáram teherhordással párhuzamosan	Q_{mer} [W]	44,172	42,530	42,090	38,909	35,863	51,764	49,905	50,541	47,986	45,068
fal hőáram	Q_{fal} [W]	30,872	82,409	27,554	33,747	28,350	40,366	54,891	49,376	59,718	50,701
fal hőátbocsátási tényezője	U_{fal} [W/m²K]	0,530	0,530	0,530	0,530	0,530	0,940	0,940	0,940	0,940	0,940
hőmérsékletkülönbség	ΔT [degC]	19,100	19,100	19,100	19,100	19,100	19,100	19,100	19,100	19,100	19,100
minimum hőmérséklet	T_{min} [degC]	13,228	12,110	12,803	13,293	13,362	13,485	13,210	12,761	13,753	12,983
teljes belső felület	$A_{belső}$ [m²]	5,267	9,521	6,304	10,697	8,513	5,267	9,521	6,304	10,697	8,513
teljes falfelület	A_{teljes} [m²]	4,316	5,977	4,324	6,633	5,474	4,316	5,977	4,324	6,633	5,474
falfelület teherhordással párhuzamosan felül	$A_{párhf}$ [m²]	1,073	0,900	0,923	0,960	1,075	1,073	0,900	0,923	0,960	1,075
falfelület teherhordással párhuzamosan alul	$A_{pársa}$ [m²]	1,133	1,250	1,250	1,210	0,976	1,133	1,250	1,250	1,210	0,976
falfelület teherhordással merőlegesen felül	A_{merf} [m²]	1,041	1,611	0,923	1,991	1,817	1,041	1,611	0,923	1,991	1,817
falfelület teherhordással merőlegesen alul	A_{mera} [m²]	1,070	2,238	1,250	2,484	1,649	1,070	2,238	1,250	2,484	1,649
falfelület 1m-es sávban balra	A_{falb} [m²]	0,990	0,990	1,000	0,990	0,946	0,990	0,990	1,000	0,990	0,946
falfelület 1m-es sávban jobbra	A_{faj} [m²]	1,000	1,790	1,490	2,053	1,606	1,000	1,790	1,490	2,053	1,606
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan felül (fal-fal)	$l_{párhf}$ [m]	1,084	0,900	0,923	0,970	1,125	1,084	0,900	0,923	0,970	1,125
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan alul (fal-fal)	$l_{pársa}$ [m]	1,144	1,250	1,250	1,210	1,021	1,144	1,250	1,250	1,210	1,021
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan párhuzamos (fal-fűdém)	$l_{párh p}$ [m]	1,000	1,000	1,000	1,000	0,956	1,000	1,000	1,000	1,000	0,956
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan merőleges	$l_{párh m}$ [m]	0,960	1,790	1,000	2,053	1,606	0,960	1,790	1,000	2,053	1,606
csatlakozási hossz teherhordásra merőlegesen felül (fal-fal)	l_{merf} [m]	1,084	0,900	0,923	0,970	1,125	1,084	0,900	0,923	0,970	1,125
csatlakozási hossz teherhordásra merőlegesen alul (fal-fal)	l_{mera} [m]	1,144	1,250	1,250	1,210	1,021	1,144	1,250	1,250	1,210	1,021
csatlakozási hossz teherhordásra merőlegesen párhuzamos	$l_{mer p}$ [m]	0,990	1,000	1,000	1,000	0,946	0,990	1,000	1,000	1,000	0,946
csatlakozási hossz teherhordásra merőlegesen merőleges (fal-fűdém)	$l_{mer m}$ [m]	0,960	1,790	1,000	2,053	1,606	0,960	1,790	1,000	2,053	1,606
csatlakozási hossz falcsatlakozás balra	l_{falb} [m]	1,000	0,990	1,000	1,000	0,946	1,000	0,990	1,000	1,000	0,946
csatlakozási hossz falcsatlakozás jobbra	l_{faj} [m]	1,000	1,790	1,490	2,053	1,606	1,000	1,790	1,490	2,053	1,606
csatlakozási hossz falcsatlakozás függőleges (fal-fal)	$l_{fal f}$ [m]	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
3D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező	L_{3D} [W/K]	4,515	5,667	4,390	5,980	5,091	5,825	7,818	6,348	8,168	6,841
2D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező teherhordásra párhuzamosan	$L_{2D párhuz}$ [W/mK]	2,313	2,227	2,204	2,037	1,964	2,710	2,613	2,646	2,512	2,468
2D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező teherhordással merőlegesen	$L_{2D mer}$ [W/mK]	2,278	2,171	2,197	2,039	2,014	2,694	2,601	2,645	2,522	2,519
2D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező falcsatlakozásnál	$L_{2D falcsatl}$ [W/mK]	1,616	4,315	1,443	1,767	1,484	2,113	2,874	2,585	3,127	2,655
vonalmonti hőátbocsátási tényező teherhordásra párhuzamosan	$\Psi_{párhuz}$ [W/mK]	1,132	1,087	1,052	0,882	0,827	0,616	0,592	0,603	0,463	0,452
vonalmonti hőátbocsátási tényező teherhordással merőlegesen	Ψ_{mer} [W/mK]	1,097	1,031	1,045	0,884	0,877	0,600	0,580	0,603	0,473	0,502
vonalmonti hőátbocsátási tényező falcsatlakozásnál	$\Psi_{falcsatl}$ [W/mK]	0,556	2,841	0,123	0,149	0,132	0,233	0,261	0,245	0,257	0,256
többszörös hővesztesség	χ [W/m²K]	-1,197	-6,554	-0,278	-0,562	-0,315	0,056	-0,012	0,526	-0,074	-0,132
saját léptékben mért hőmérséklet	f_{rsi} [-]	0,645	0,587	0,623	0,649	0,652	0,659	0,645	0,621	0,673	0,633

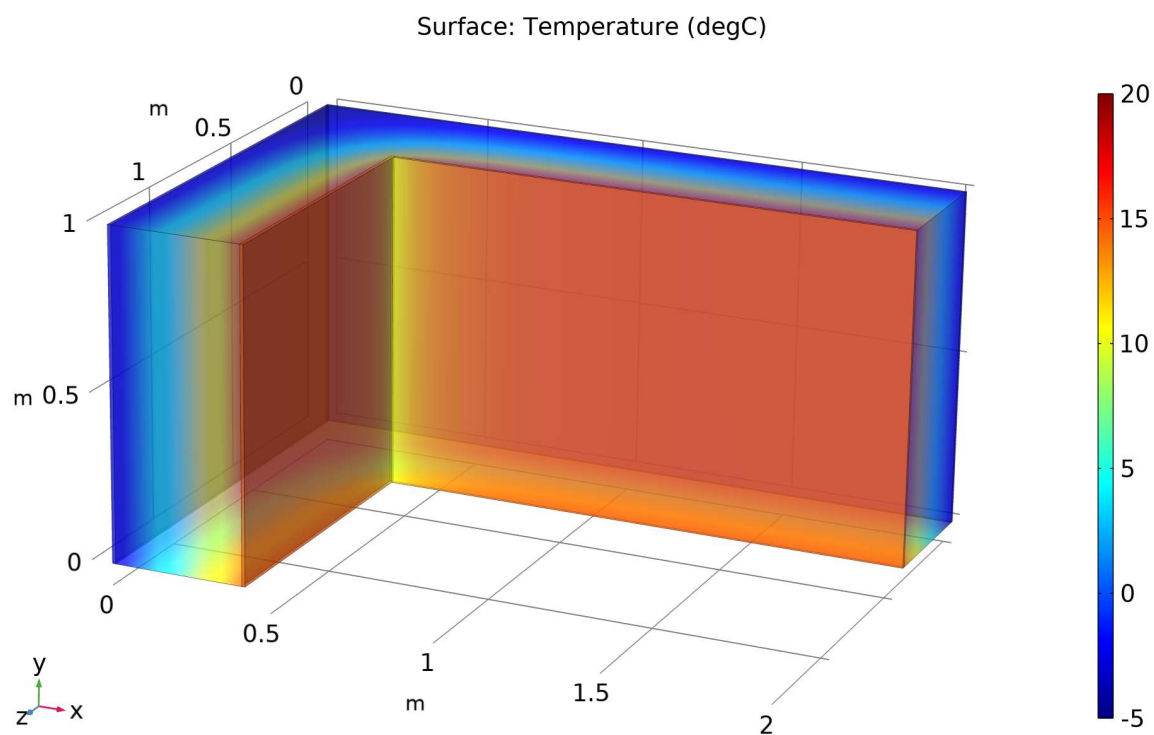
2. táblázat: Felújítási változatok higrotermikus szimulációjának eredményei

		2-2 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon					3-3 cm hőszigetelő vakolat külső/belső oldalon				
		E gerendás fűdém	Horsik- fűdém	Bohn- fűdém	Monier- fűdém	poroszsüveg fűdém	E gerendás fűdém	Horsik- fűdém	Bohn- fűdém	Monier- fűdém	poroszsüveg fűdém
teljes hőáram	$Q_{össz}$ [W]	85,484	114,950	85,955	121,930	102,230	70,071	105,720	70,041	100,070	83,906
hőáram teherhordással merőlegesen	$Q_{párh}$ [W]	36,648	68,966	38,809	76,704	59,935	30,801	56,218	31,609	62,611	50,723
hőáram teherhordással párhuzamosan	Q_{mer} [W]	39,628	38,873	38,811	37,307	35,093	32,259	31,717	31,605	46,003	28,640
fal hőáram	Q_{fal} [W]	48,402	40,554	36,485	60,060	37,462	31,520	32,178	20,440	35,000	29,727
fal hőátbocsátási tényezője	U_{fal} [W/m ² K]	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550
hőmérsékletkülönbség	ΔT [degC]	19,100	19,100	19,100	19,100	19,100	19,100	19,100	19,100	19,100	19,100
minimum hőmérséklet	T_{min} [degC]	14,204	14,182	13,359	14,556	13,767	14,730	14,972	13,897	14,975	14,264
teljes belső felület	$A_{belső}$ [m ²]	5,267	9,521	6,304	10,697	8,513	5,267	9,521	6,304	10,697	8,513
teljes fal felület	A_{teljes} [m ²]	4,316	5,977	4,324	6,633	5,474	4,316	5,977	4,324	6,633	5,474
fal felület teherhordással párhuzamosan felül	$A_{párhf}$ [m ²]	1,073	0,900	0,923	0,960	1,075	1,073	0,900	0,923	0,960	1,075
fal felület teherhordással párhuzamosan alul	$A_{párla}$ [m ²]	1,133	1,250	1,250	1,210	0,976	1,133	1,250	1,250	1,210	0,976
fal felület teherhordással merőlegesen felül	A_{merf} [m ²]	1,041	1,611	0,923	1,991	1,817	1,041	1,611	0,923	1,991	1,817
fal felület teherhordással merőlegesen alul	A_{merla} [m ²]	1,070	2,238	1,250	2,484	1,649	1,070	2,238	1,250	2,484	1,649
fal felület 1m-es sávban balra	A_{falb} [m ²]	0,990	0,990	1,000	0,990	0,946	0,990	0,990	1,000	0,990	0,946
fal felület 1m-es sávban jobbra	A_{faj} [m ²]	1,000	1,790	1,490	2,053	1,606	1,000	1,790	1,490	2,053	1,606
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan felül (fal-fal)	$l_{párhf}$ [m]	1,084	0,900	0,923	0,970	1,125	1,084	0,900	0,923	0,970	1,125
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan alul (fal-fal)	$l_{párla}$ [m]	1,144	1,250	1,250	1,210	1,021	1,144	1,250	1,250	1,210	1,021
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan párhuzamos (fal-fűdém)	$l_{párlp}$ [m]	1,000	1,000	1,000	1,000	0,956	1,000	1,000	1,000	1,000	0,956
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan merőleges	$l_{párlm}$ [m]	0,960	1,790	1,000	2,053	1,606	0,960	1,790	1,000	2,053	1,606
csatlakozási hossz teherhordásra merőlegesen felül (fal-fal)	l_{merf} [m]	1,084	0,900	0,923	0,970	1,125	1,084	0,900	0,923	0,970	1,125
csatlakozási hossz teherhordásra merőlegesen alul (fal-fal)	l_{merla} [m]	1,144	1,250	1,250	1,210	1,021	1,144	1,250	1,250	1,210	1,021
csatlakozási hossz teherhordásra merőlegesen párhuzamos	l_{merp} [m]	0,990	1,000	1,000	1,000	0,946	0,990	1,000	1,000	1,000	0,946
csatlakozási hossz teherhordásra merőlegesen merőleges (fal-fűdém)	l_{merm} [m]	0,960	1,790	1,000	2,053	1,606	0,960	1,790	1,000	2,053	1,606
csatlakozási hossz falcsatlakozás balra	l_{falb} [m]	1,000	0,990	1,000	1,000	0,946	1,000	0,990	1,000	1,000	0,946
csatlakozási hossz falcsatlakozás jobbra	l_{faj} [m]	1,000	1,790	1,490	2,053	1,606	1,000	1,790	1,490	2,053	1,606
csatlakozási hossz falcsatlakozás függőleges (fal-fal)	l_{falp} [m]	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
3D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező	L_{3D} [W/K]	4,476	6,018	4,500	6,384	5,352	3,669	5,535	3,667	5,239	4,393
2D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező teherhordásra párhuzamosan	$L_{2Dpárhuz}$ [W/mK]	2,075	2,035	2,032	1,953	1,922	1,689	1,661	1,655	2,409	1,568
2D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező teherhordással merőlegesen	L_{2Dmer} [W/mK]	1,999	2,017	2,032	1,957	1,954	1,680	1,644	1,655	1,597	1,654
2D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező falcsatlakozásnál	$L_{2Dfalcsatl}$ [W/mK]	2,534	2,123	1,910	3,145	1,961	1,650	1,685	1,070	1,832	1,556
vonalmonti hőátbocsátási tényező teherhordásra párhuzamosan	$\Psi_{párhuz}$ [W/mK]	0,515	0,530	0,511	0,427	0,420	0,464	0,478	0,460	1,210	0,389
vonalmonti hőátbocsátási tényező teherhordással merőlegesen	Ψ_{mer} [W/mK]	0,439	0,512	0,511	0,431	0,452	0,454	0,462	0,460	0,398	0,474
vonalmonti hőátbocsátási tényező falcsatlakozásnál	$\Psi_{falcsatl}$ [W/mK]	1,134	0,177	0,167	1,008	0,175	0,550	0,156	-0,299	0,154	0,153
többszörös hővesztés	χ [W/m ² K]	-2,009	-0,009	0,073	-1,776	-0,013	-0,831	0,596	1,008	-0,777	-0,102
saját léptékben mért hőmérséklet	f_{rsi} [-]	0,697	0,695	0,652	0,715	0,674	0,724	0,737	0,680	0,737	0,700

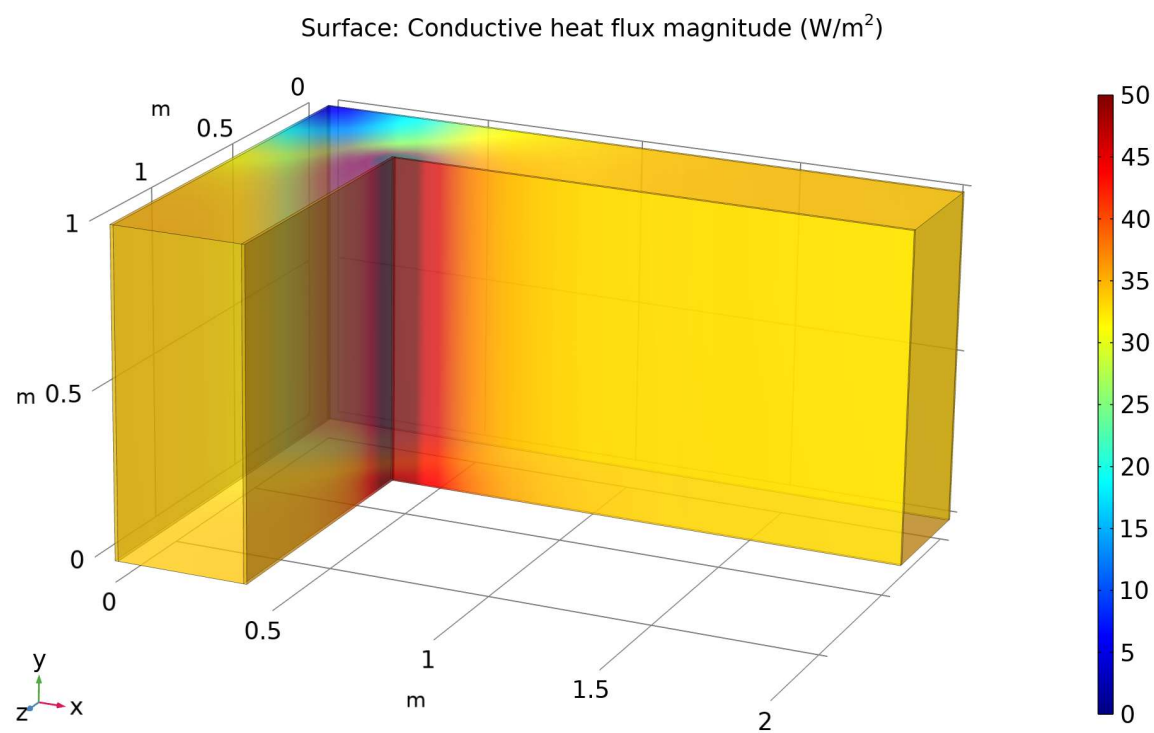
3. táblázat: Felújítási változatok higrotermikus szimulációjának eredményei

		5 cm Multipor hőszigetelés belső oldalon + 1 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon					5 cm Multipor hőszigetelés belső oldalon + 2 cm hőszigetelő vakolat külső oldalon				
		E gerendás földém	Horcsik-földém	Bohn-földém	Monier-földém	poroszsüveg földém	E gerendás földém	Horcsik-földém	Bohn-földém	Monier-földém	poroszsüveg földém
teljes hőáram	$Q_{össz}$ [W]	74,894	94,790	73,715	101,320	86,380	-	-	64,633	-	-
hőáram teherhordással merőlegesen	$Q_{párh}$ [W]	35,322	63,397	35,776	69,206	53,663	-	-	40,799	-	-
hőáram teherhordással párhuzamosan	Q_{mer} [W]	37,225	36,146	35,831	33,699	31,245	-	-	40,588	-	-
fal hőáram	Q_{fal} [W]	20,373	28,285	25,281	30,914	26,003	-	-	26,394	-	-
fal hőátbocsátási tényezője	U_{fal} [W/m ² K]	0,490	0,490	0,490	0,490	0,490	-	-	0,430	-	-
hőmérsékletkülönbség	ΔT [degC]	19,100	19,100	19,100	19,100	19,100	-	-	19,100	-	-
minimum hőmérséklet	T_{min} [degC]	14,360	13,043	13,663	13,979	14,036	-	-	14,497	-	-
teljes belső felület	$A_{belső}$ [m ²]	5,267	9,521	6,304	10,697	8,513	-	-	6,304	-	-
teljes falfelület	A_{teljes} [m ²]	4,316	5,977	4,324	6,633	5,474	-	-	4,324	-	-
falfelület teherhordással párhuzamosan felül	$A_{párhf}$ [m ²]	1,073	0,900	0,923	0,960	1,075	-	-	0,923	-	-
falfelület teherhordással párhuzamosan alul	$A_{párla}$ [m ²]	1,133	1,250	1,250	1,210	0,976	-	-	1,250	-	-
falfelület teherhordással merőlegesen felül	A_{merf} [m ²]	1,041	1,611	0,923	1,991	1,817	-	-	0,923	-	-
falfelület teherhordással merőlegesen alul	A_{merla} [m ²]	1,070	2,238	1,250	2,484	1,649	-	-	1,250	-	-
falfelület 1m-es sávban balra	A_{falb} [m ²]	0,990	0,990	1,000	0,990	0,946	-	-	1,000	-	-
falfelület 1m-es sávban jobbra	A_{fajb} [m ²]	1,000	1,790	1,490	2,053	1,606	-	-	1,490	-	-
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan felül (fal-fal)	$l_{párhf}$ [m]	1,084	0,900	0,923	0,970	1,125	-	-	0,923	-	-
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan alul (fal-fal)	$l_{párla}$ [m]	1,144	1,250	1,250	1,210	1,021	-	-	1,250	-	-
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan párhuzamos (fal-földém)	$l_{párlp}$ [m]	1,000	1,000	1,000	1,000	0,956	-	-	1,000	-	-
csatlakozási hossz teherhordással párhuzamosan merőleges	$l_{párlm}$ [m]	0,960	1,790	1,000	2,053	1,606	-	-	1,000	-	-
csatlakozási hossz teherhordásra merőlegesen felül (fal-fal)	l_{merf} [m]	1,084	0,900	0,923	0,970	1,125	-	-	0,923	-	-
csatlakozási hossz teherhordásra merőlegesen alul (fal-fal)	l_{merla} [m]	1,144	1,250	1,250	1,210	1,021	-	-	1,250	-	-
csatlakozási hossz teherhordásra merőlegesen párhuzamos	l_{merp} [m]	0,990	1,000	1,000	1,000	0,946	-	-	1,000	-	-
csatlakozási hossz teherhordásra merőlegesen merőleges (fal-földém)	l_{merm} [m]	0,960	1,790	1,000	2,053	1,606	-	-	1,000	-	-
csatlakozási hossz falcsatlakozás balra	l_{falb} [m]	1,000	0,990	1,000	1,000	0,946	-	-	1,000	-	-
csatlakozási hossz falcsatlakozás jobbra	l_{fajb} [m]	1,000	1,790	1,490	2,053	1,606	-	-	1,490	-	-
csatlakozási hossz falcsatlakozás függőleges (fal-fal)	l_{falp} [m]	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	-	-	1,000	-	-
3D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező	L_{3D} [W/K]	3,921	4,963	3,859	5,305	4,523	-	-	3,384	-	-
2D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező teherhordásra párhuzamosan	$L_{2Dpárhuz}$ [W/mK]	1,949	1,892	1,876	1,764	1,711	-	-	2,125	-	-
2D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező teherhordással merőlegesen	L_{2Dmer} [W/mK]	1,926	1,854	1,873	1,765	1,749	-	-	2,136	-	-
2D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező falcsatlakozásnál	$L_{2Dfalcsatl}$ [W/mK]	1,067	1,481	1,324	1,619	1,361	-	-	1,382	-	-
vonalmonti hőátbocsátási tényező teherhordásra párhuzamosan	$\Psi_{párhuz}$ [W/mK]	0,857	0,839	0,811	0,696	0,660	-	-	1,191	-	-
vonalmonti hőátbocsátási tényező teherhordással merőlegesen	Ψ_{mer} [W/mK]	0,835	0,801	0,808	0,697	0,698	-	-	1,202	-	-
vonalmonti hőátbocsátási tényező falcsatlakozásnál	$\Psi_{falcsatl}$ [W/mK]	0,087	0,119	0,104	0,123	0,111	-	-	0,311	-	-
többszörös hővezetési tényező	χ [W/m ² K]	-0,045	-0,504	-0,115	-0,346	-0,171	-	-	-1,553	-	-
saját léptékben mért hőmérséklet	f_{rsi} [-]	0,705	0,636	0,668	0,685	0,688	-	-	0,712	-	-

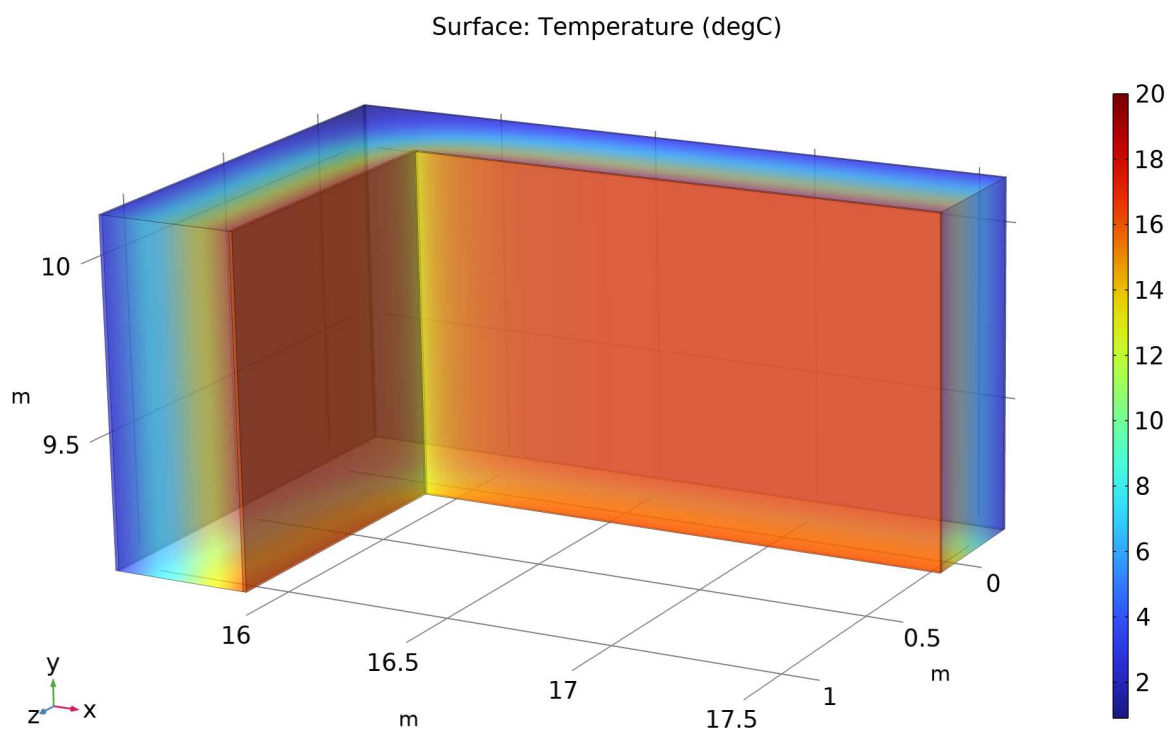
4. táblázat: Felújítási változatok higrotermikus szimulációjának eredményei



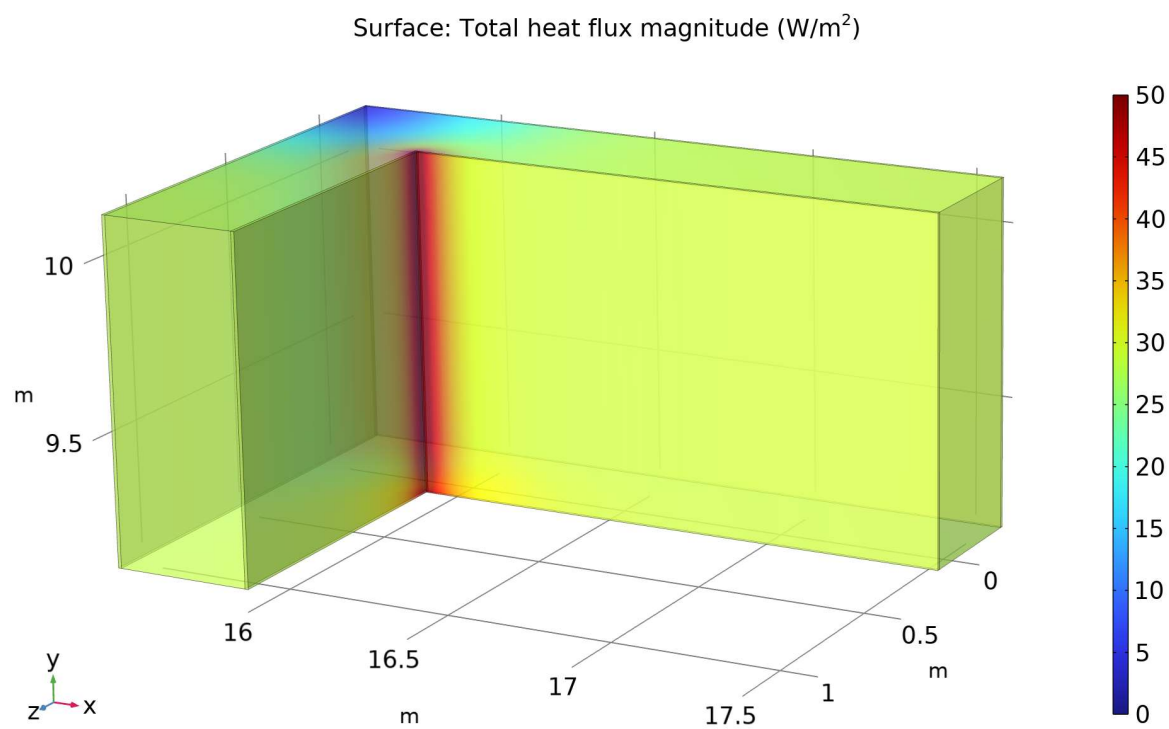
1. ábra: 1 méter magas fal hőáramsűrűség ábrája hőtechnikai szimulációból



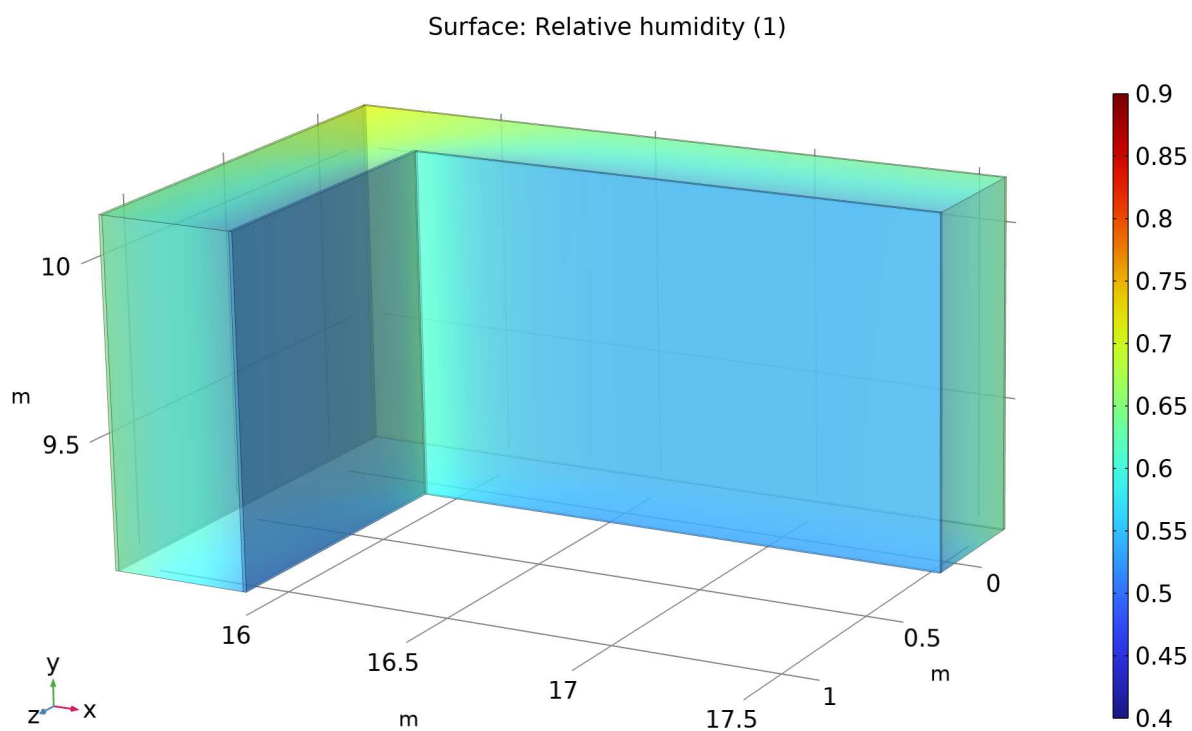
2. ábra: 1 m magas fal hőáramsűrűség ábrája hőtechnikai szimulációból



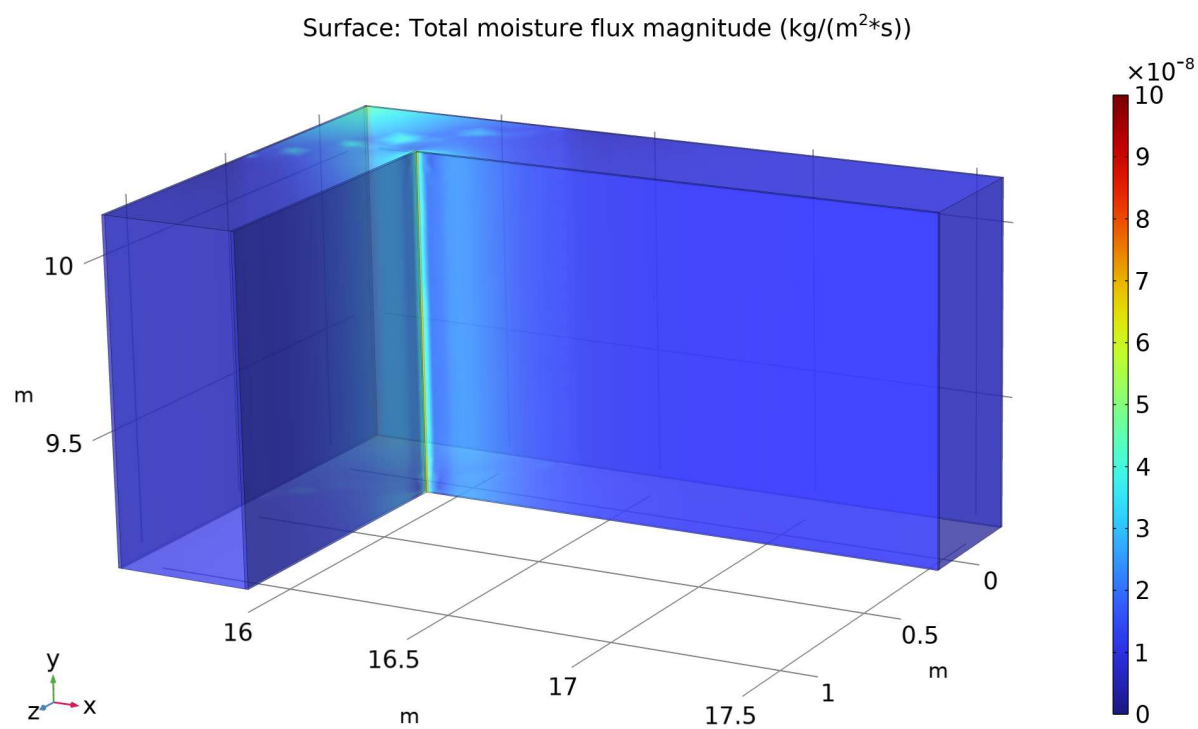
3. ábra: 1 méter magas fal hőáramsűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



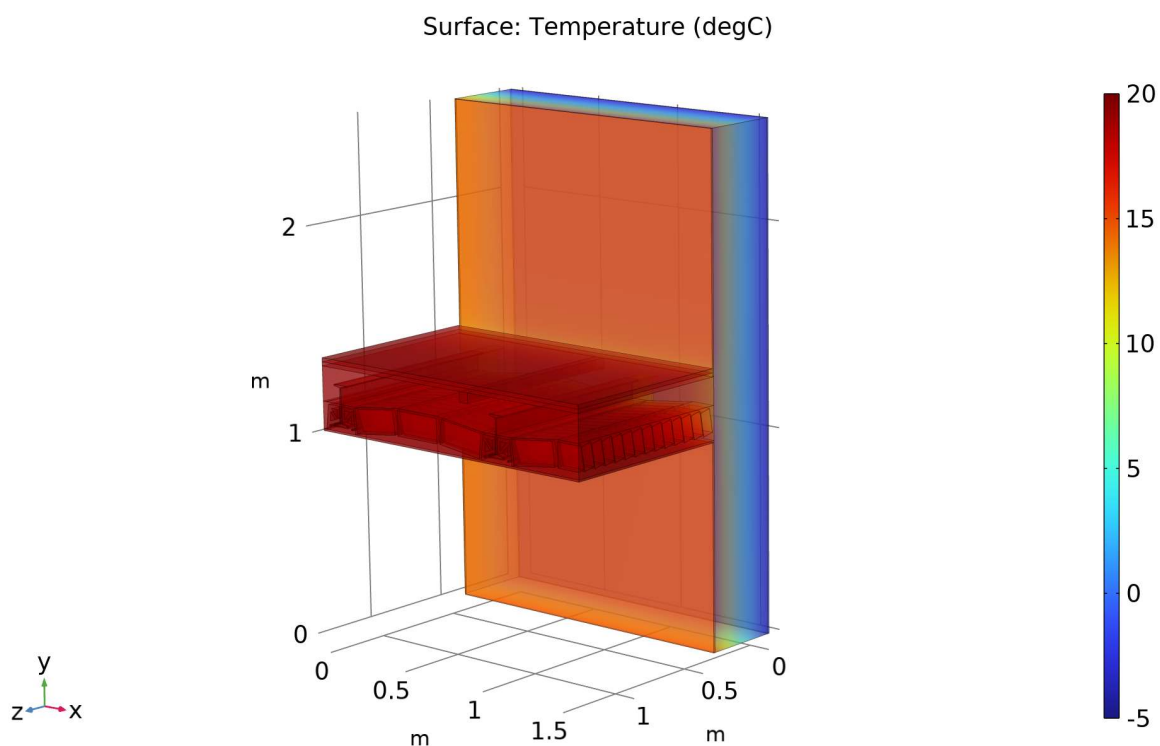
4. ábra: 1 méter magas fal hőáramsűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



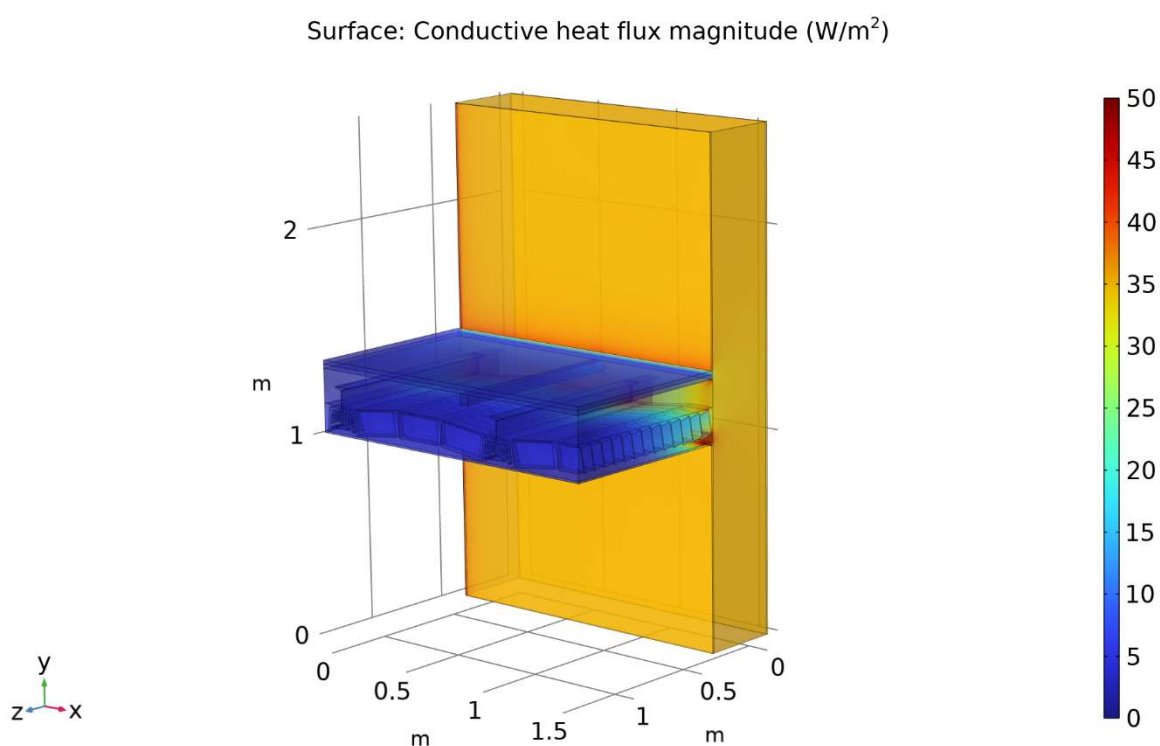
5. ábra: 1 méter magas fal relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimulációból



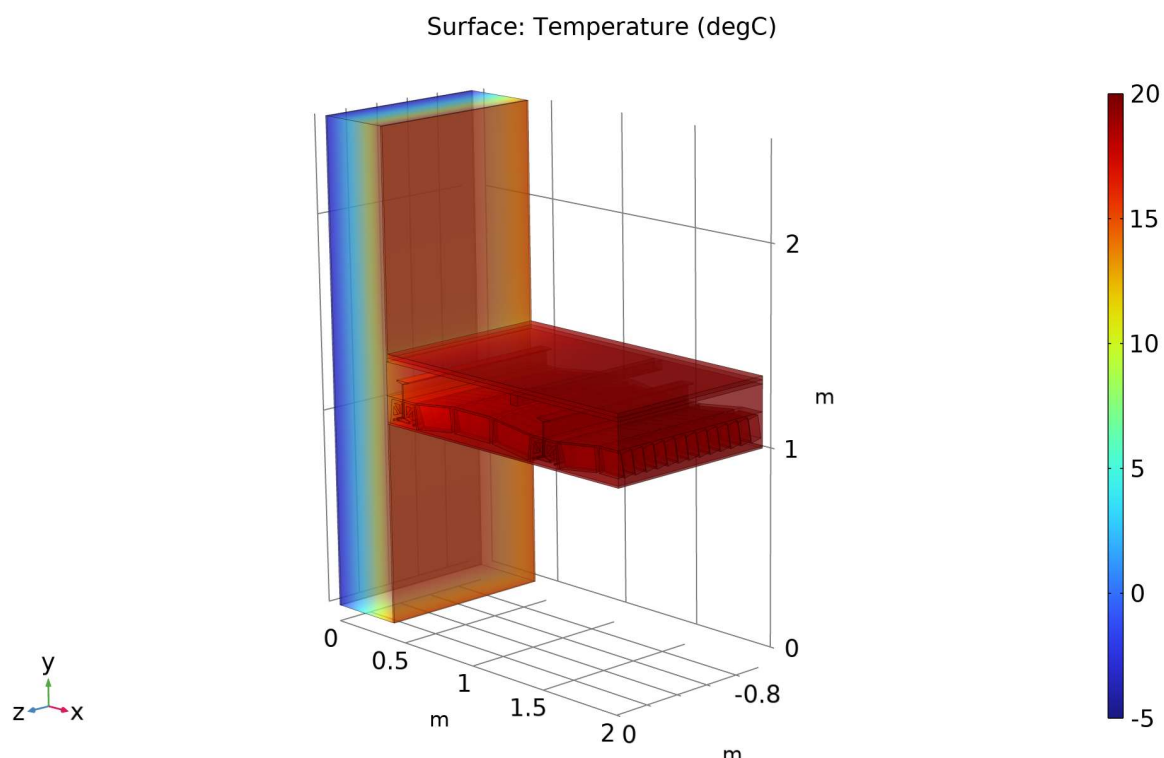
6. ábra: 1 méter magas fal nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



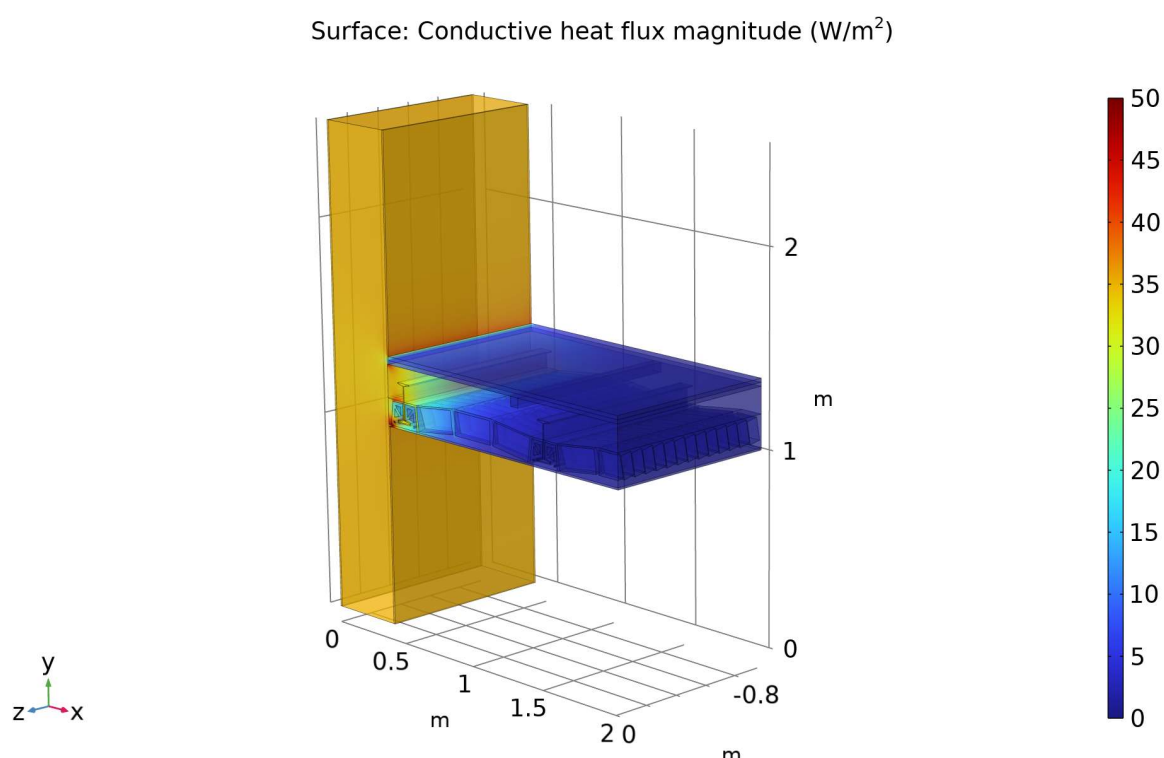
7. ábra: Poroszsüveg földem teherhordással párhuzamos irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



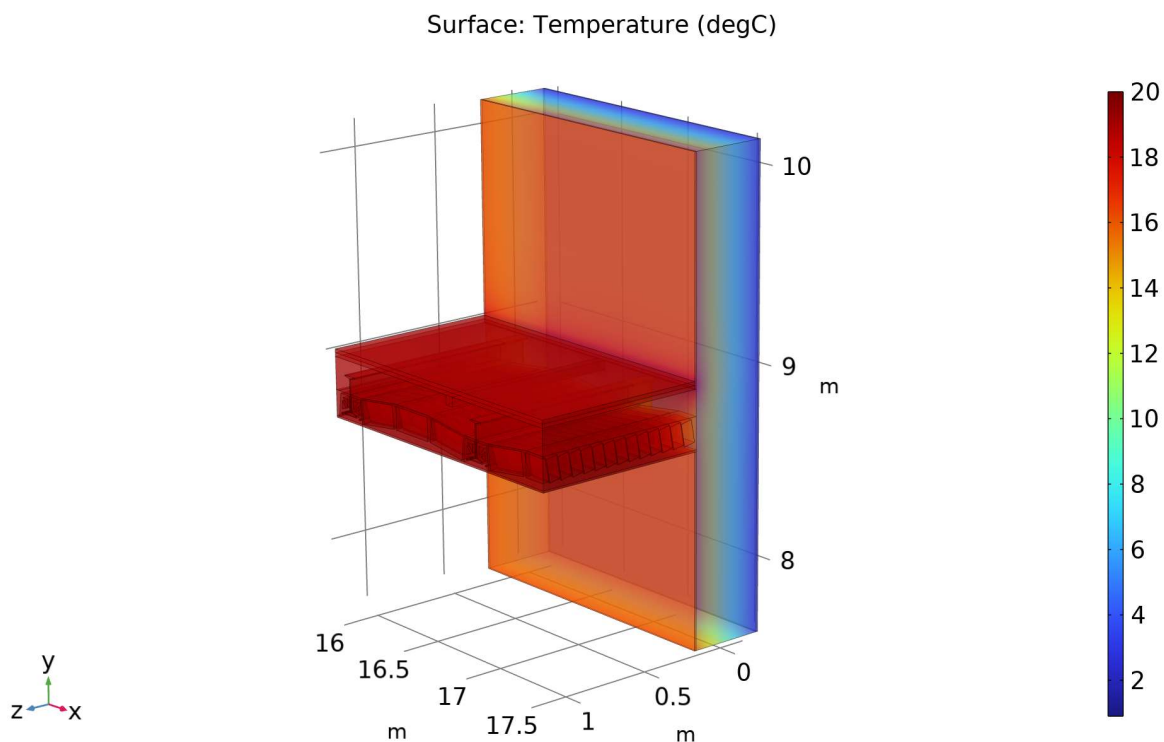
8. ábra: Poroszsüveg földem teherhordással párhuzamos irányú hőáramsűrűség eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



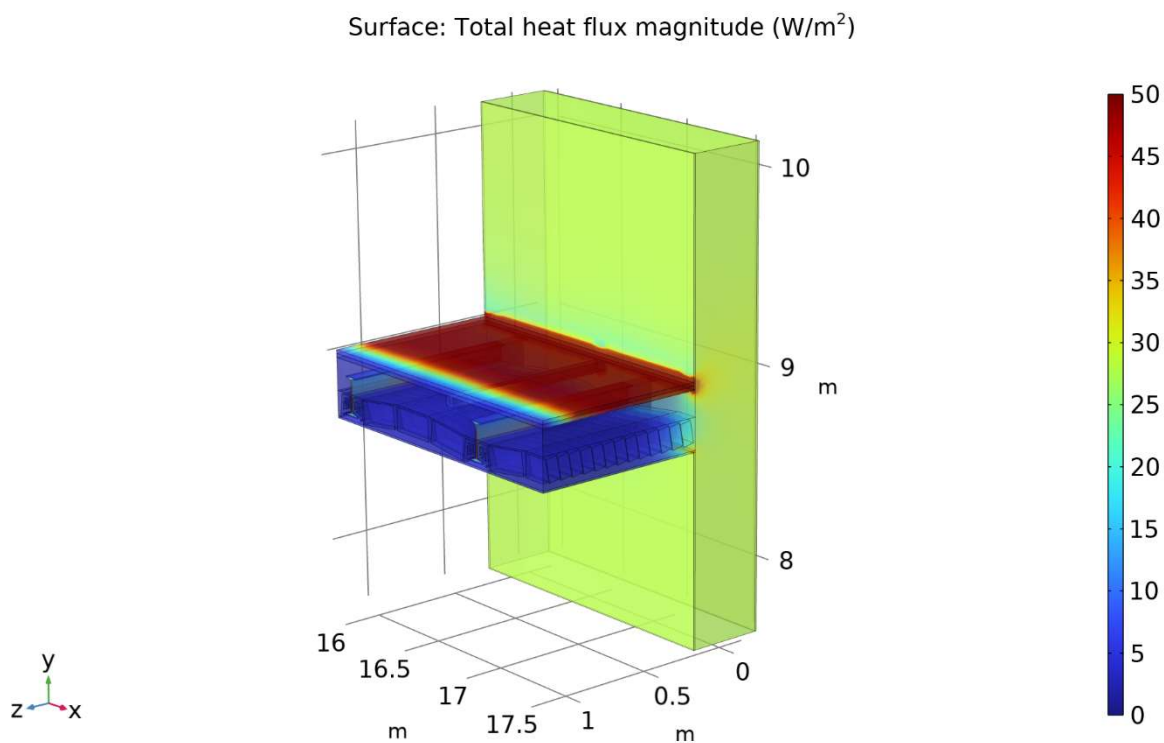
9. ábra: Poroszsüveg földem teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



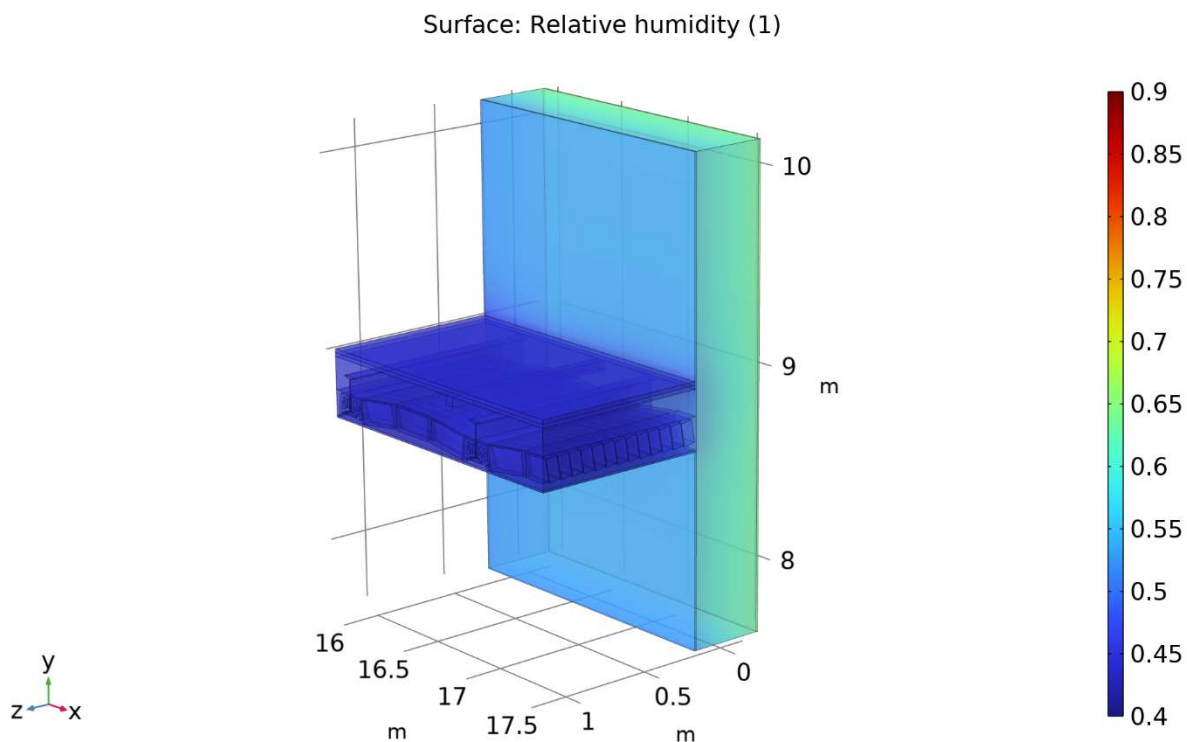
10. ábra: Poroszsüveg földem teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



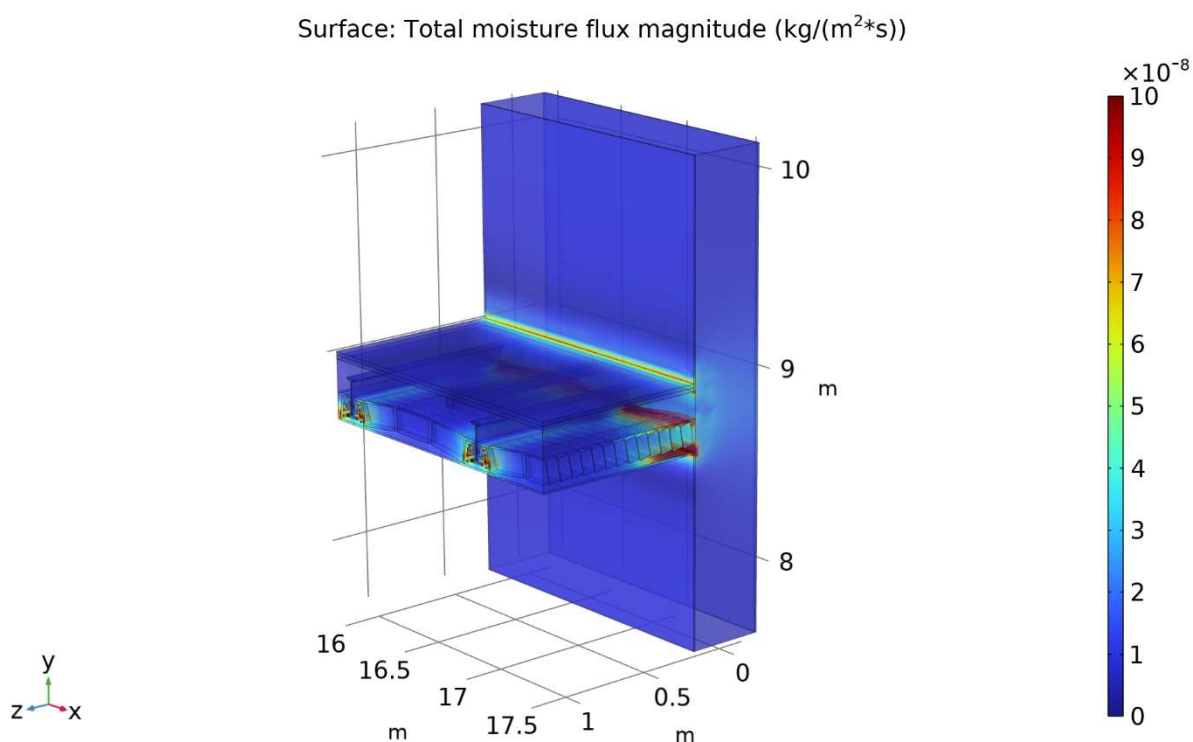
11. ábra: Poroszsüveg földem teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimulációból



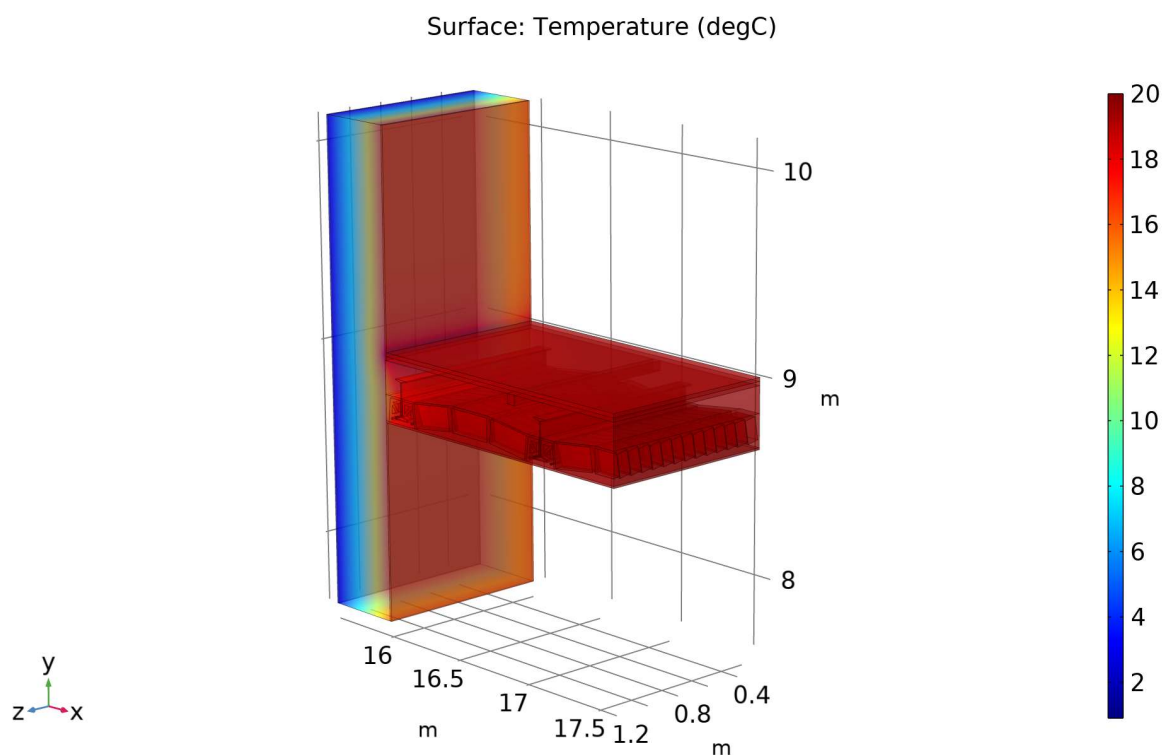
12. ábra: Poroszsüveg földem teherhordással merőleges irányú hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



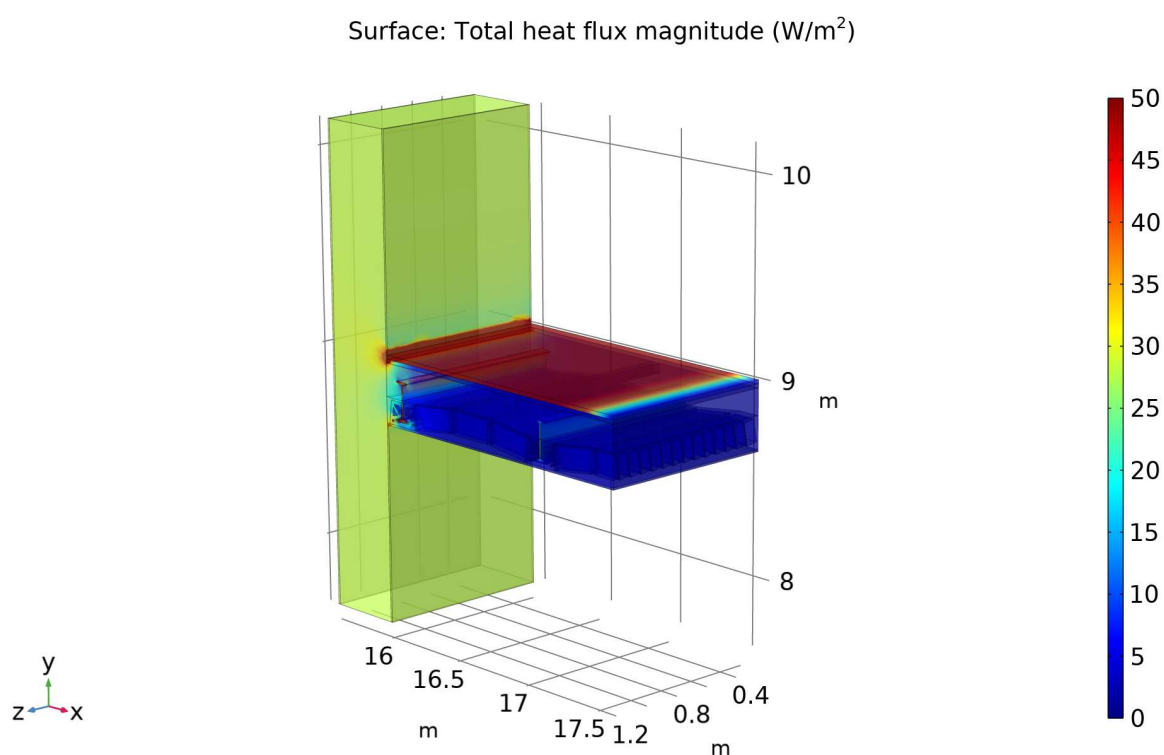
13. ábra: Poroszsüveg földem teherhordással merőleges irányú relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimulációból



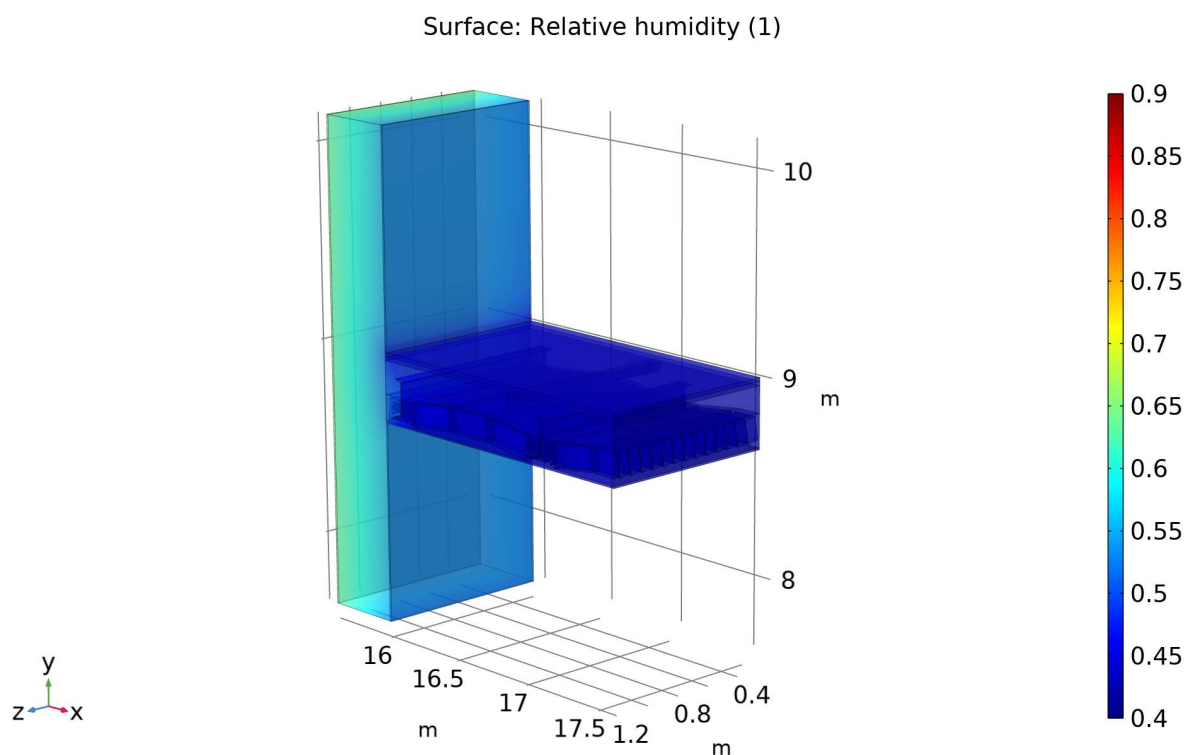
14. ábra: Poroszsüveg földem teherhordással merőleges irányú nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



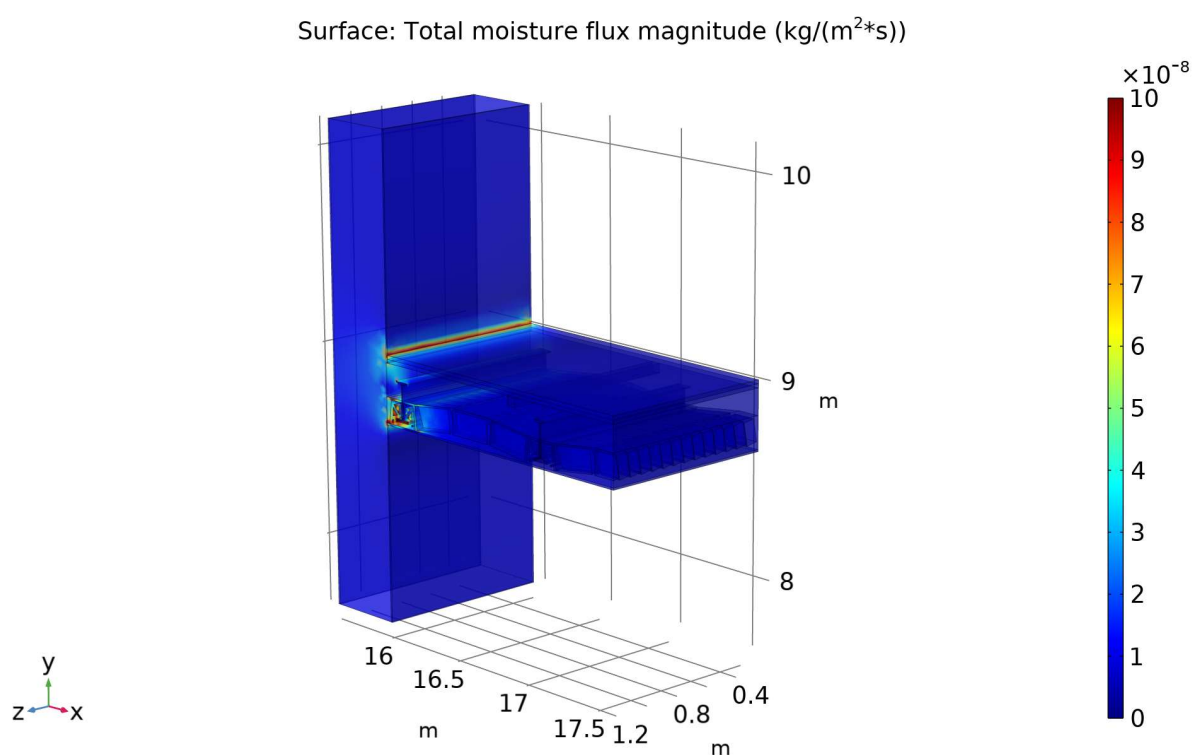
15. ábra: Poroszsüveg földem teherhordással párhuzamos irányú hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimulációból



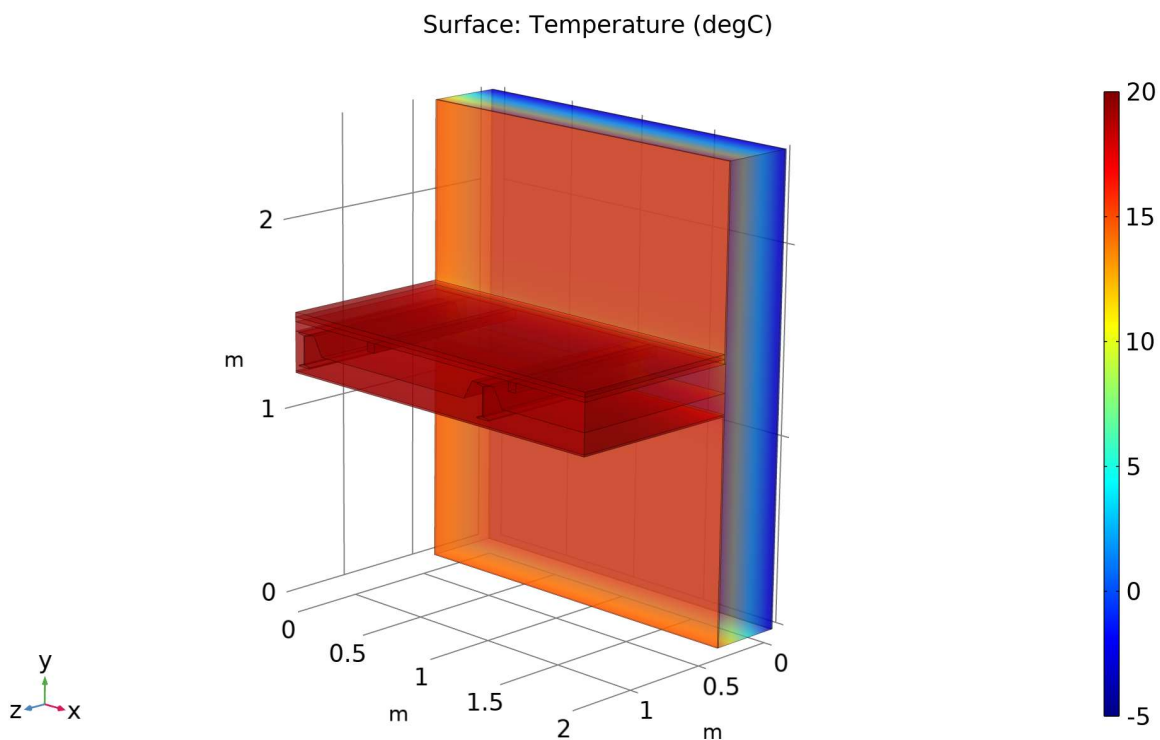
16. ábra: Poroszsüveg földem teherhordással merőleges irányú hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



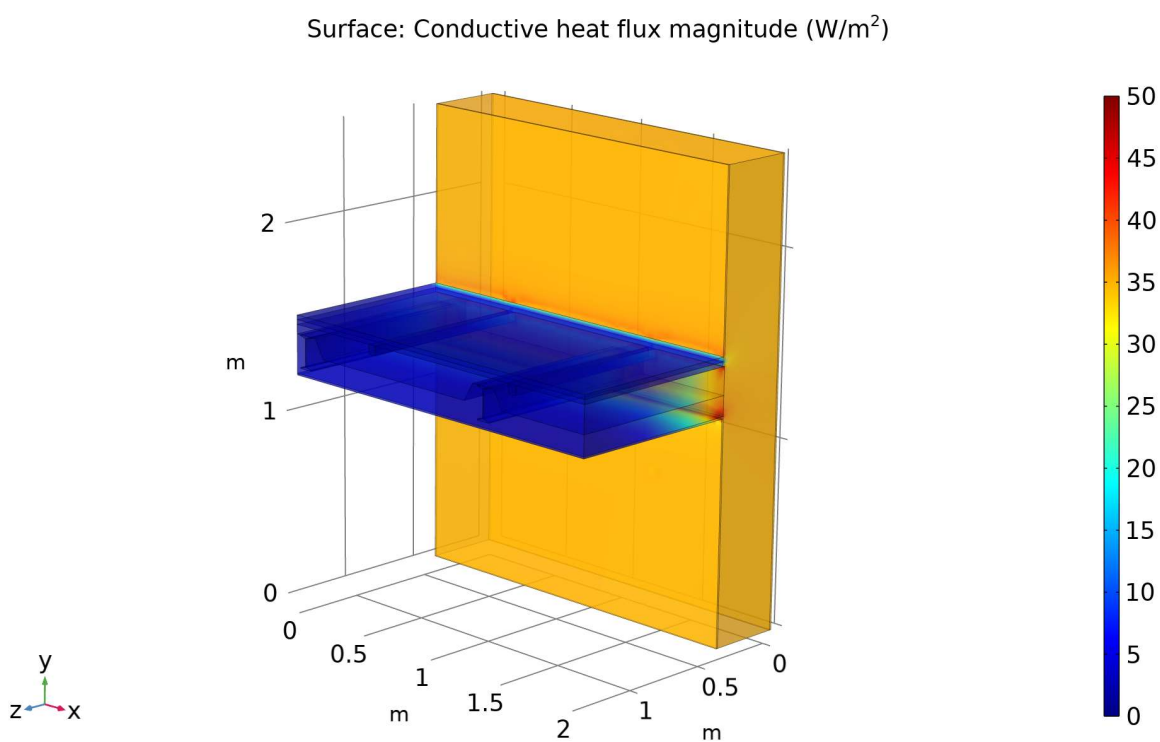
17. ábra: Poroszsüveg földem teherhordással merőleges irányú relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimulációból



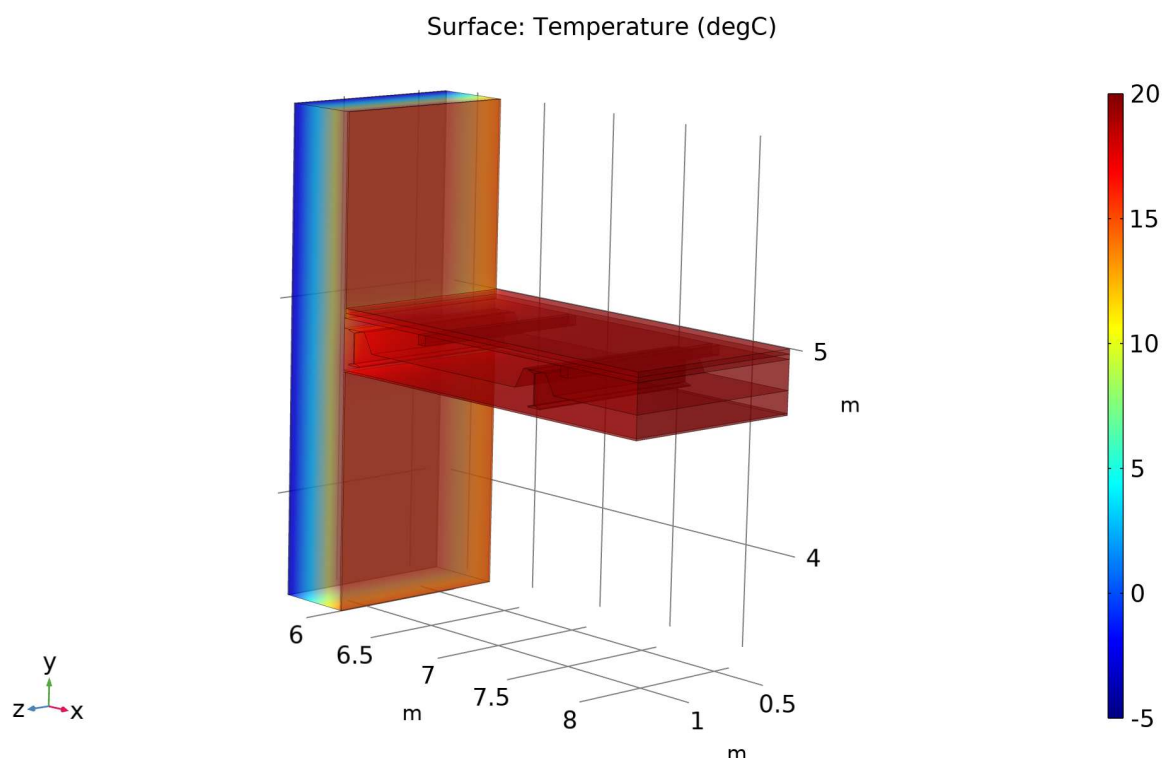
18. ábra: Poroszsüveg földem teherhordással merőleges irányú nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



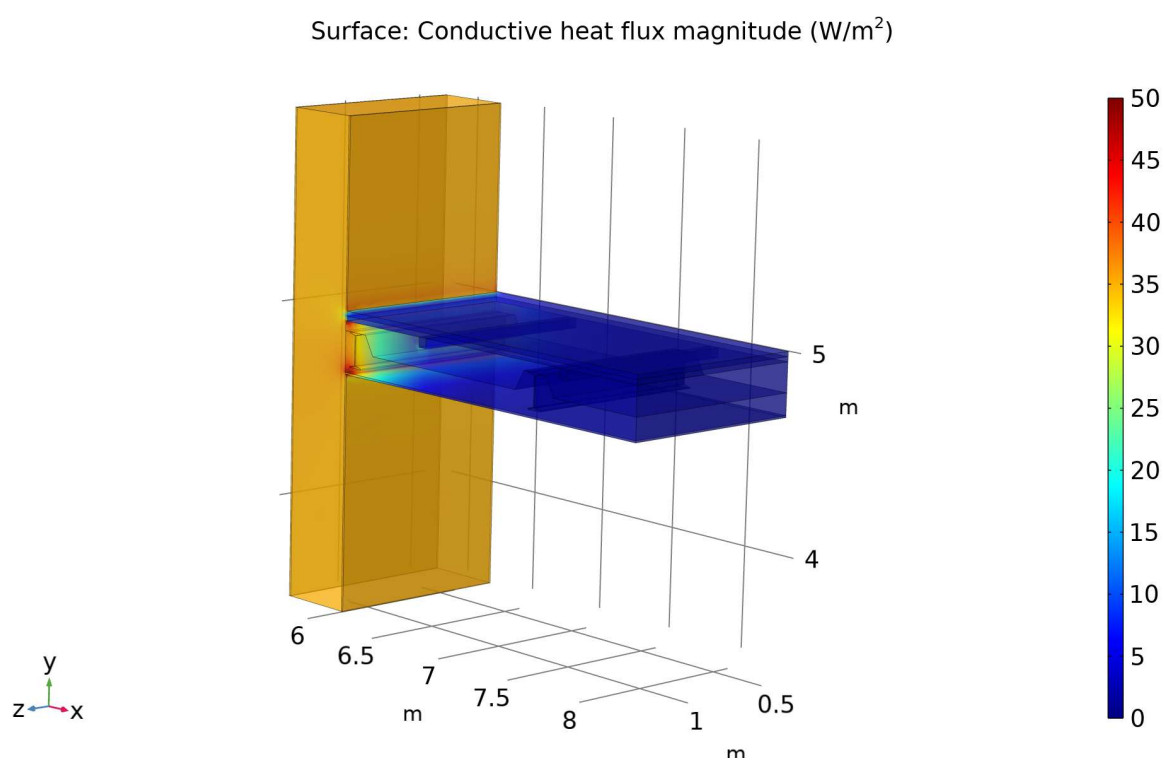
19. ábra: Monier-födém teherhordással párhuzamos irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



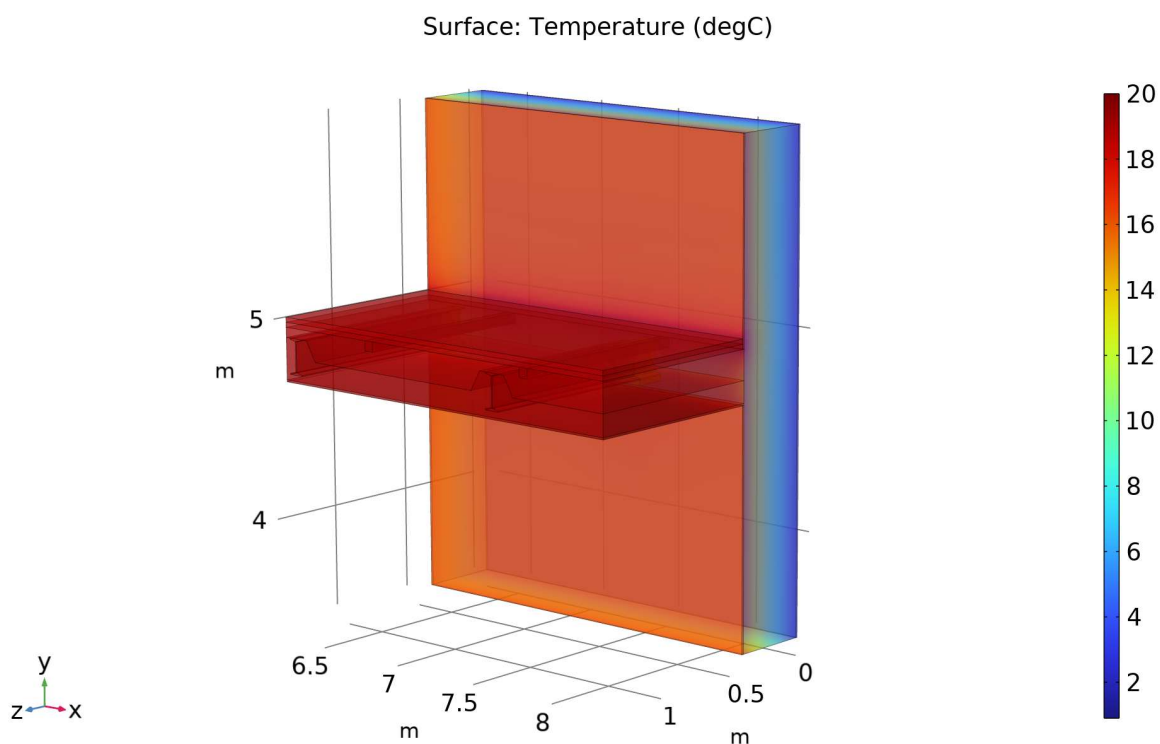
20. ábra: Monier-födém teherhordással párhuzamos irányú hőáramsűrűség eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



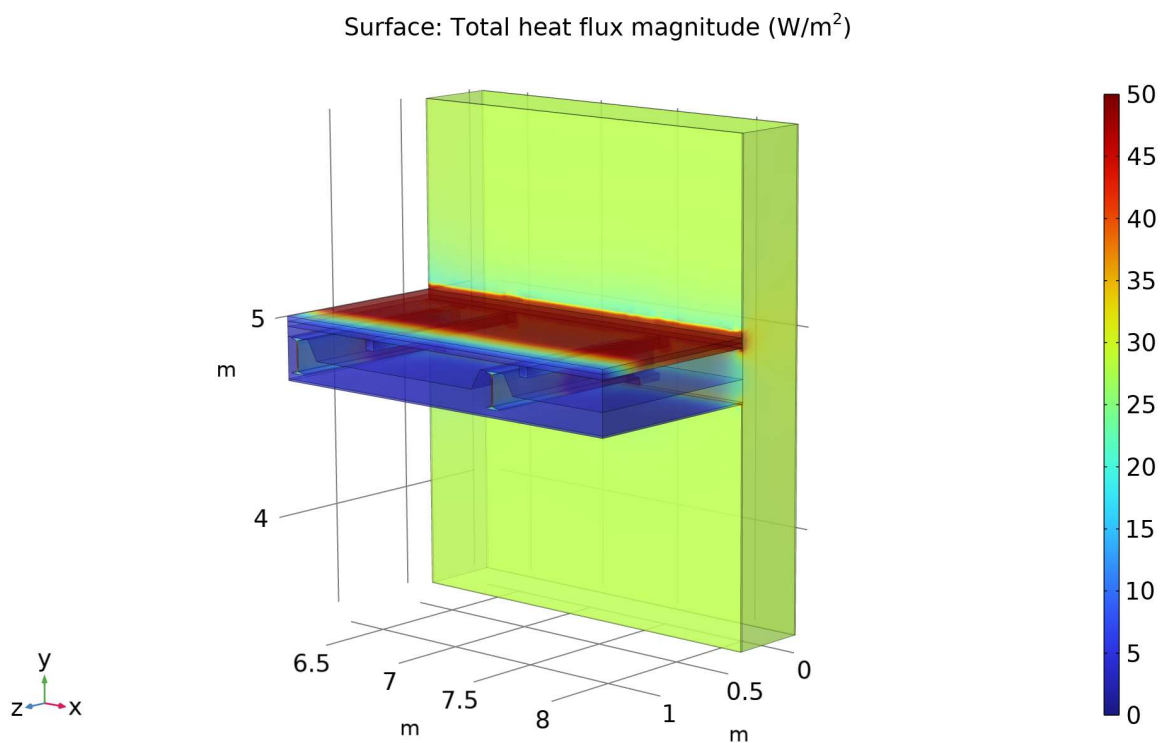
21. ábra: Monier-födém teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



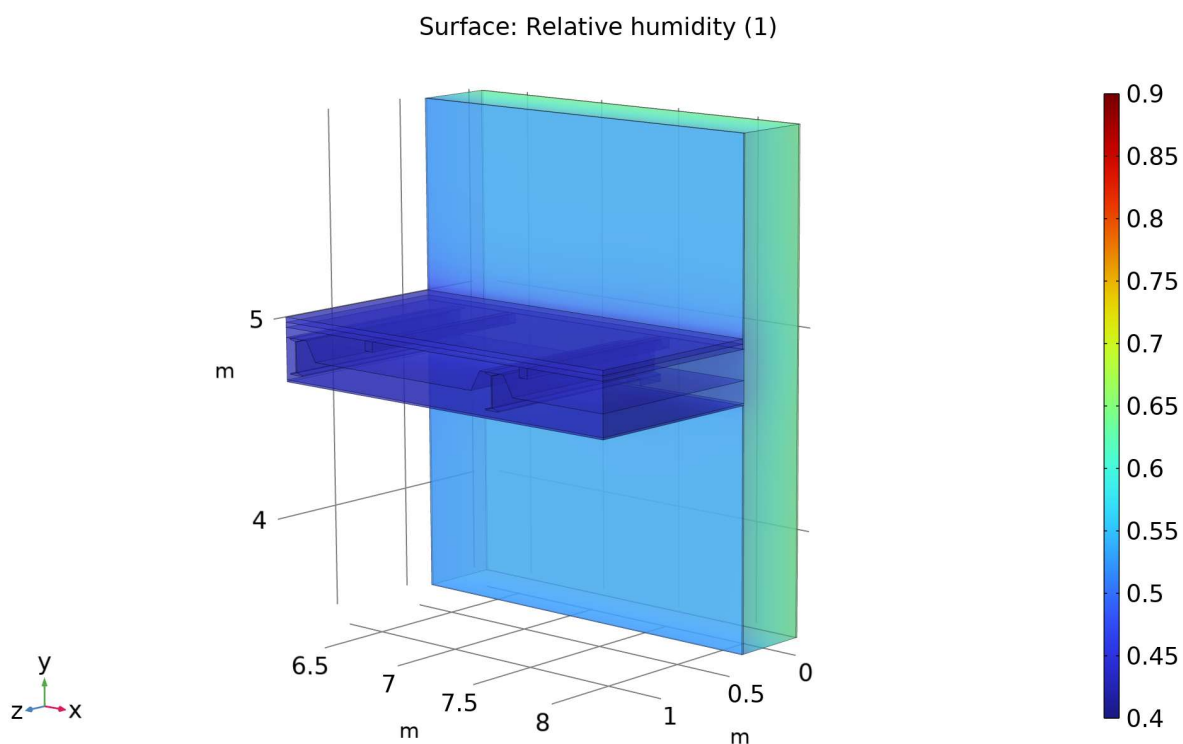
22. ábra: Monier-födém teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



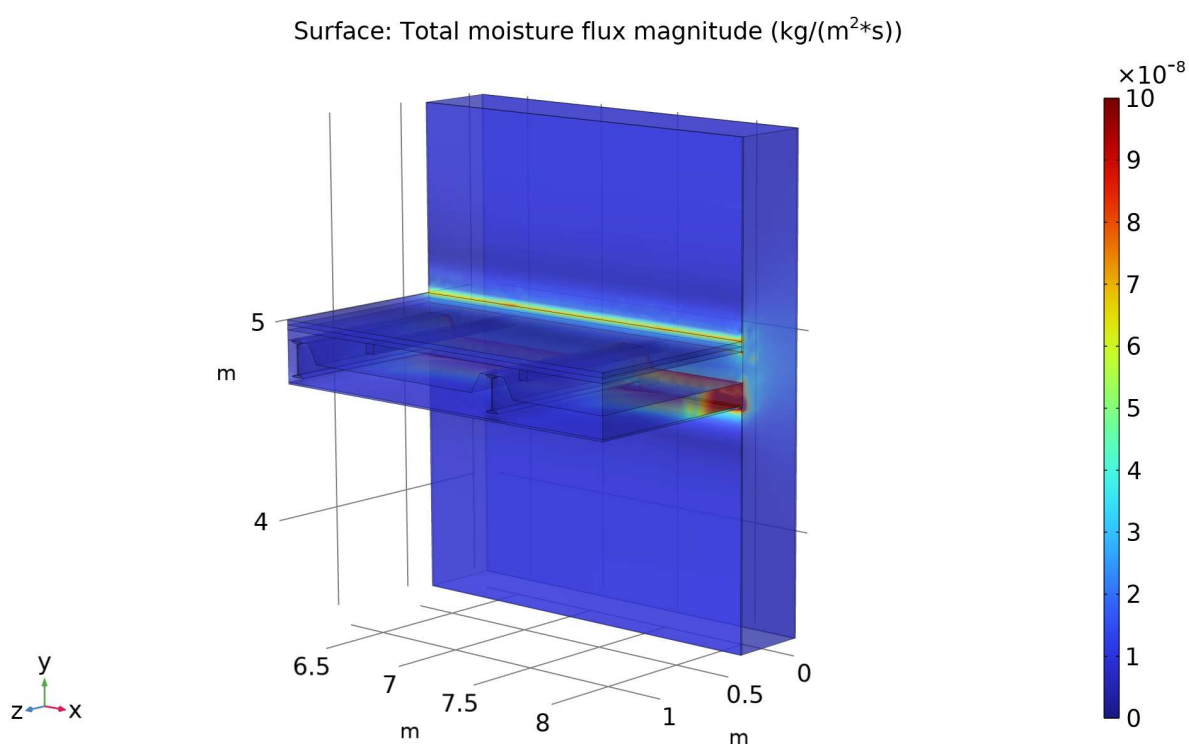
23. ábra: Monier-födém teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimulációból



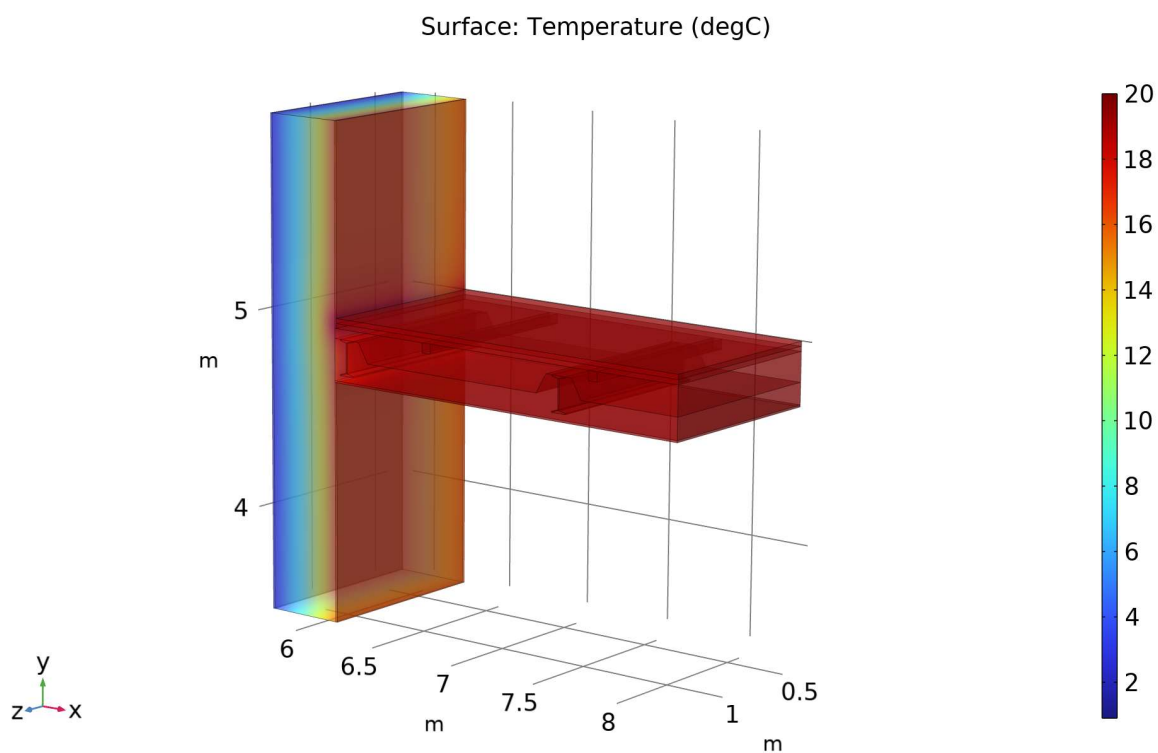
24. ábra: Monier-födém teherhordással merőleges irányú hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



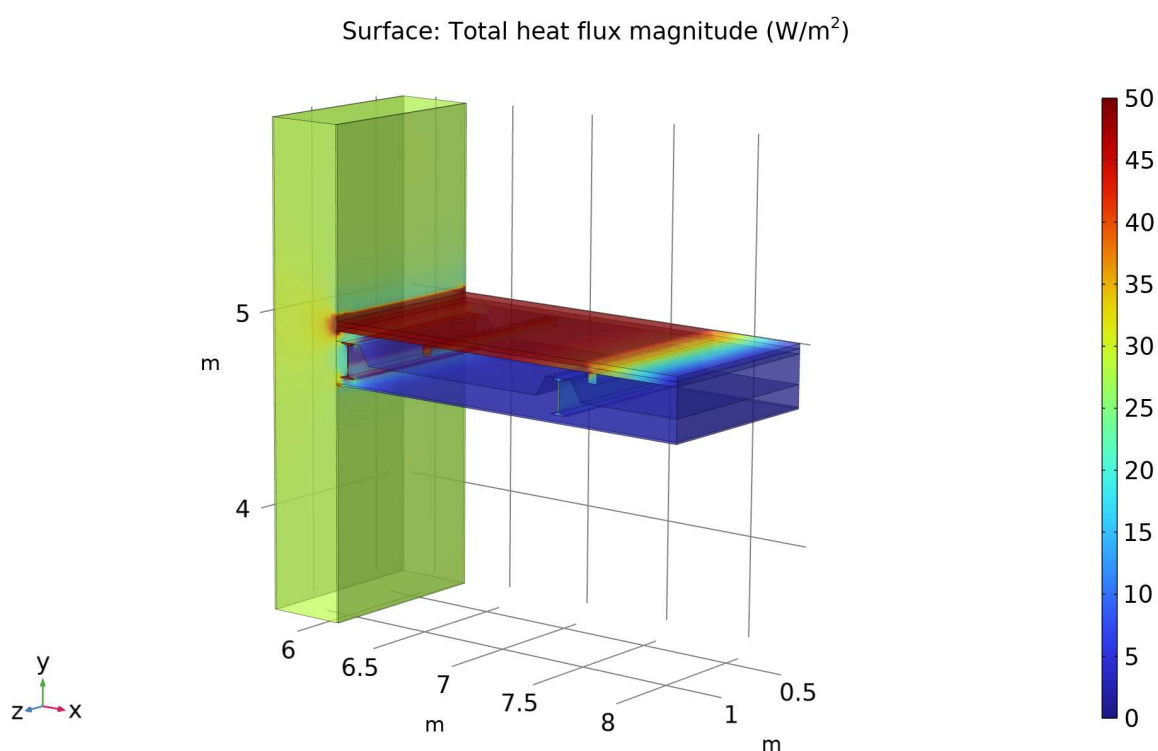
25. ábra: Monier-födém teherhordással merőleges irányú relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimulációból



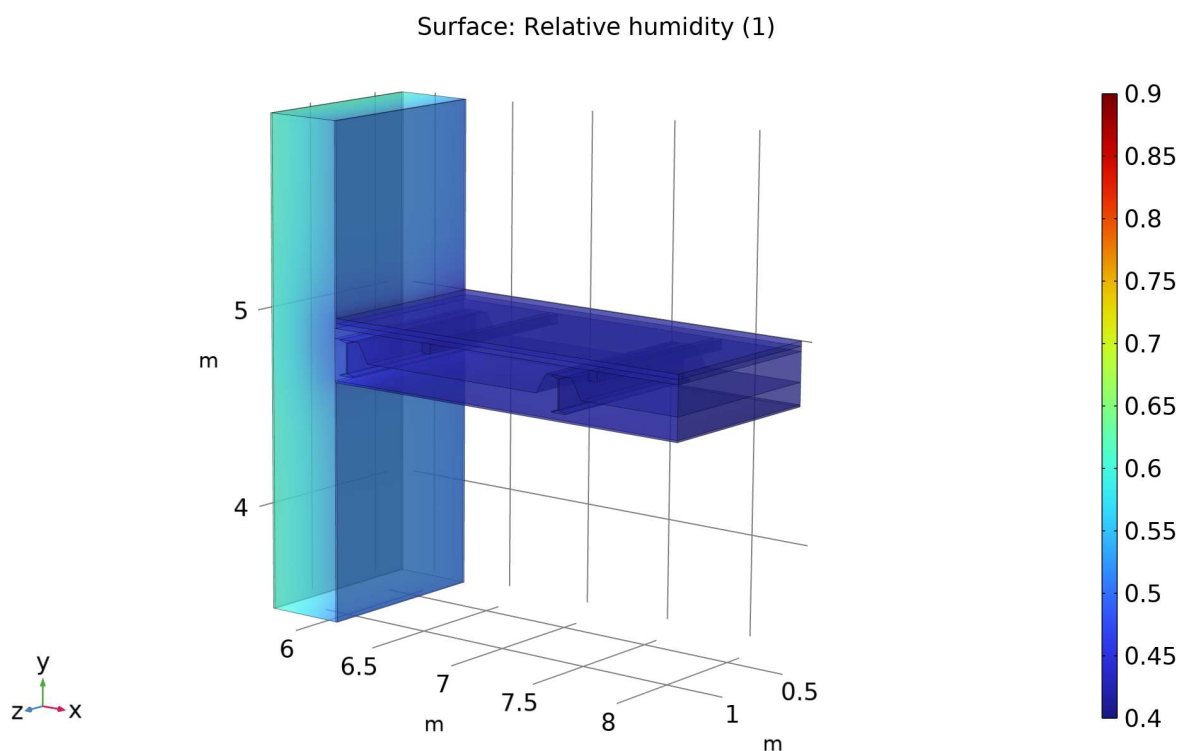
26. ábra: Monier-födém teherhordással merőleges irányú nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



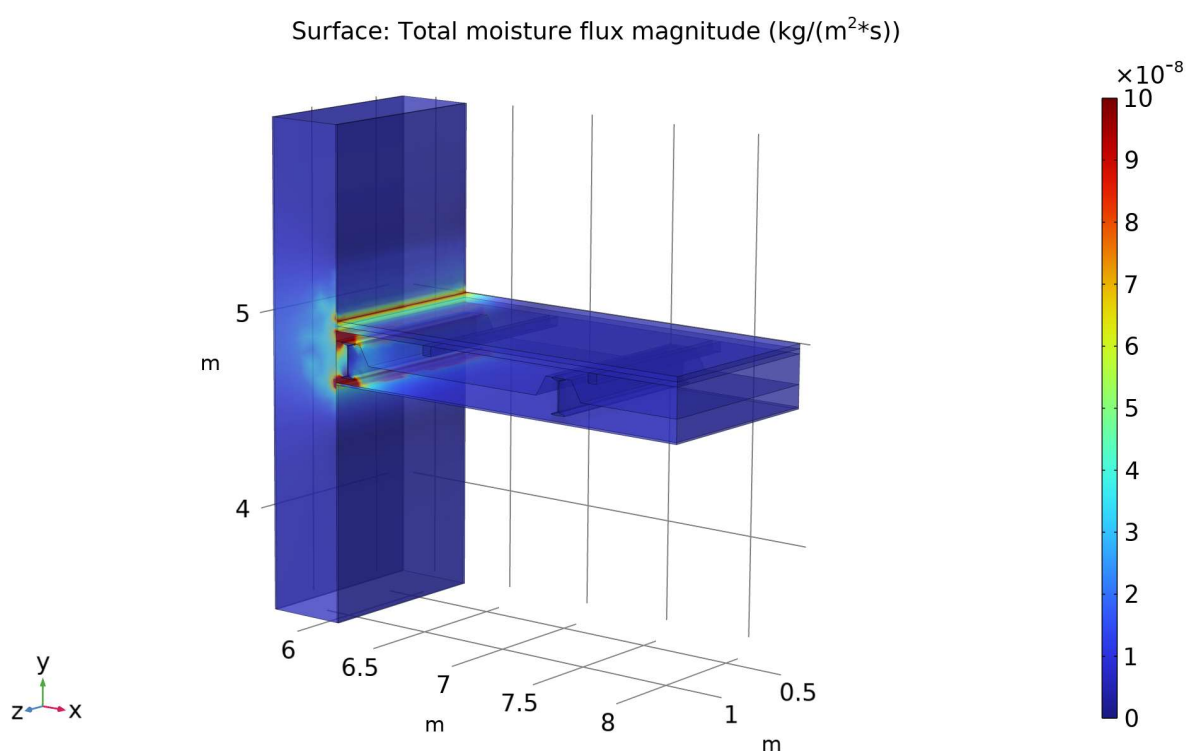
27. ábra: Monier-födém teherhordással párhuzamos irányú hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimulációból



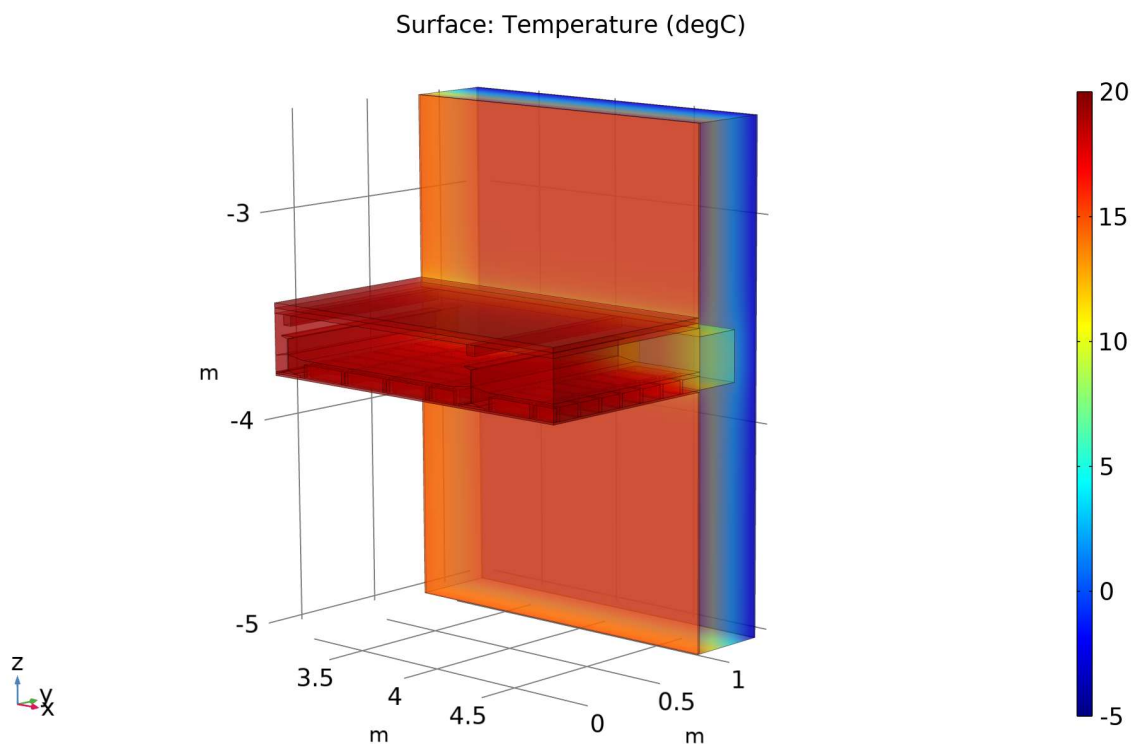
28. ábra: Monier-födém teherhordással merőleges irányú hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



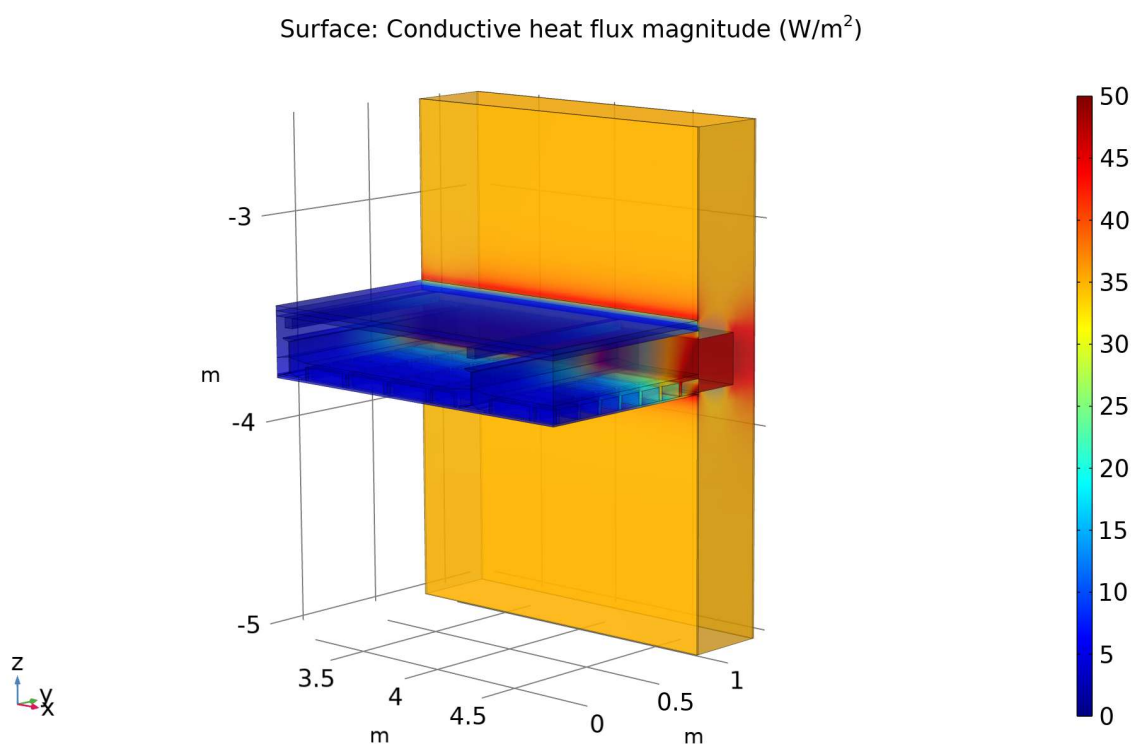
29. ábra: Monier-födém teherhordással merőleges irányú relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimulációból



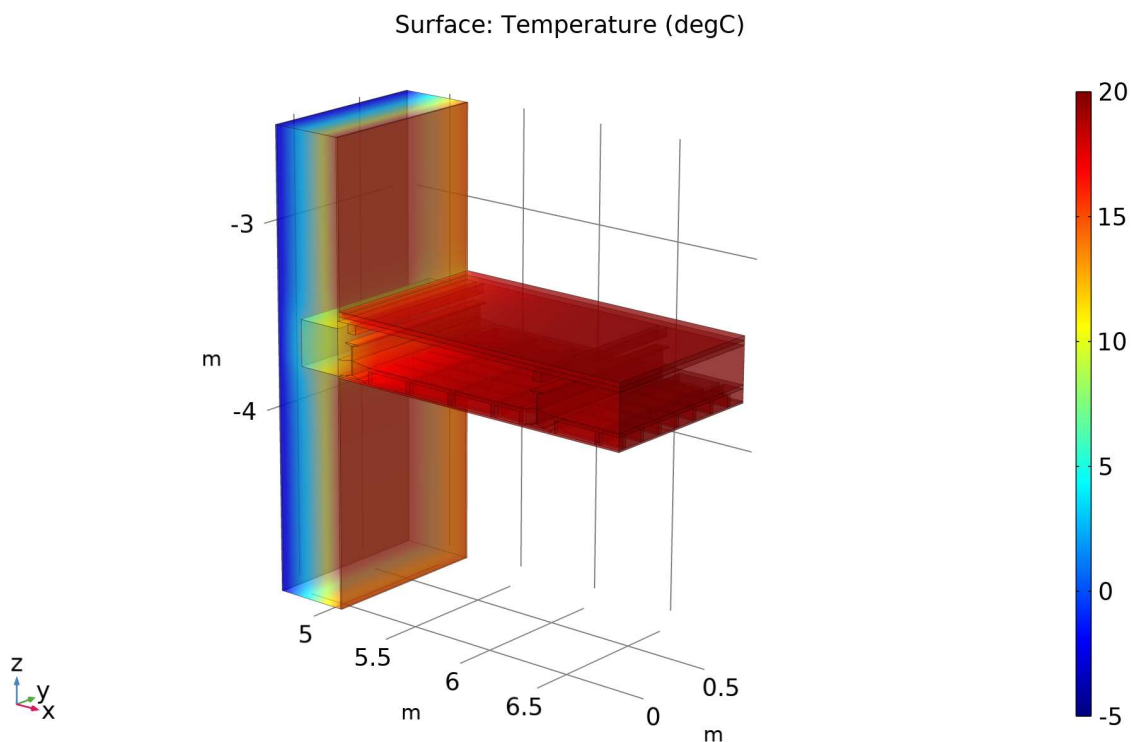
30. ábra: Monier-födém teherhordással merőleges irányú nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



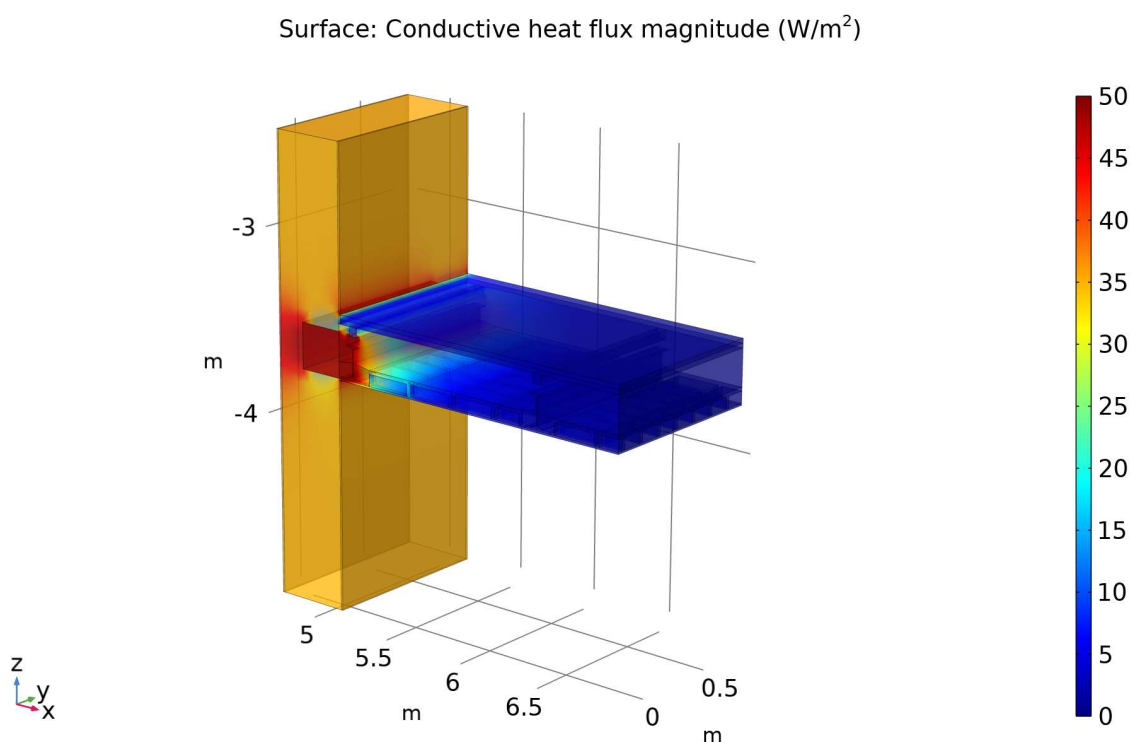
31. ábra: Horcsik-födém teherhordással párhuzamos irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



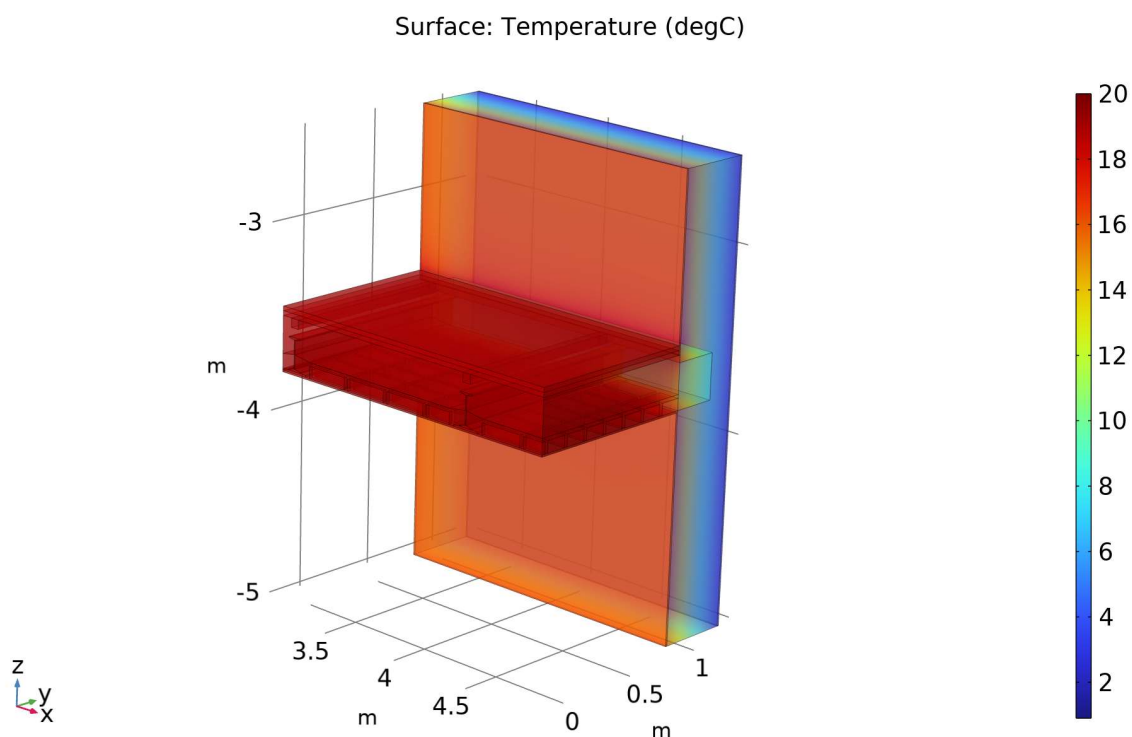
32. ábra: Horcsik -födém teherhordással párhuzamos irányú hőáramsűrűség eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



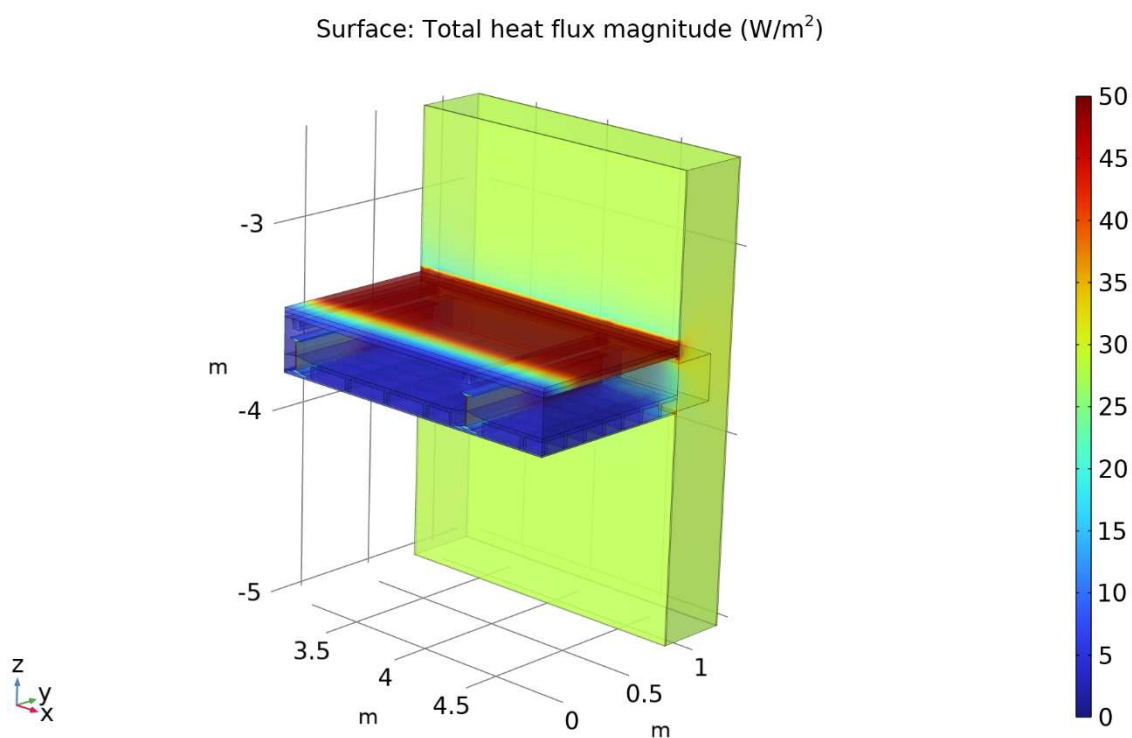
33. ábra: Horcsik-födém teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



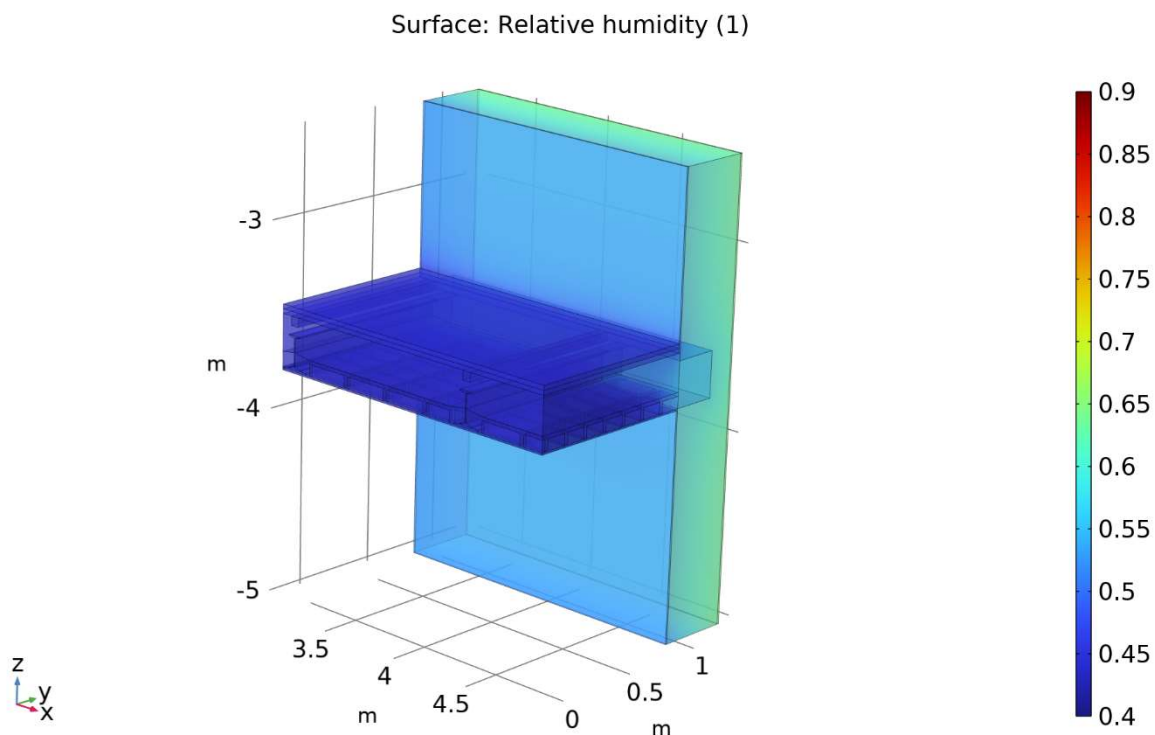
34. ábra: Horcsik-födém teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



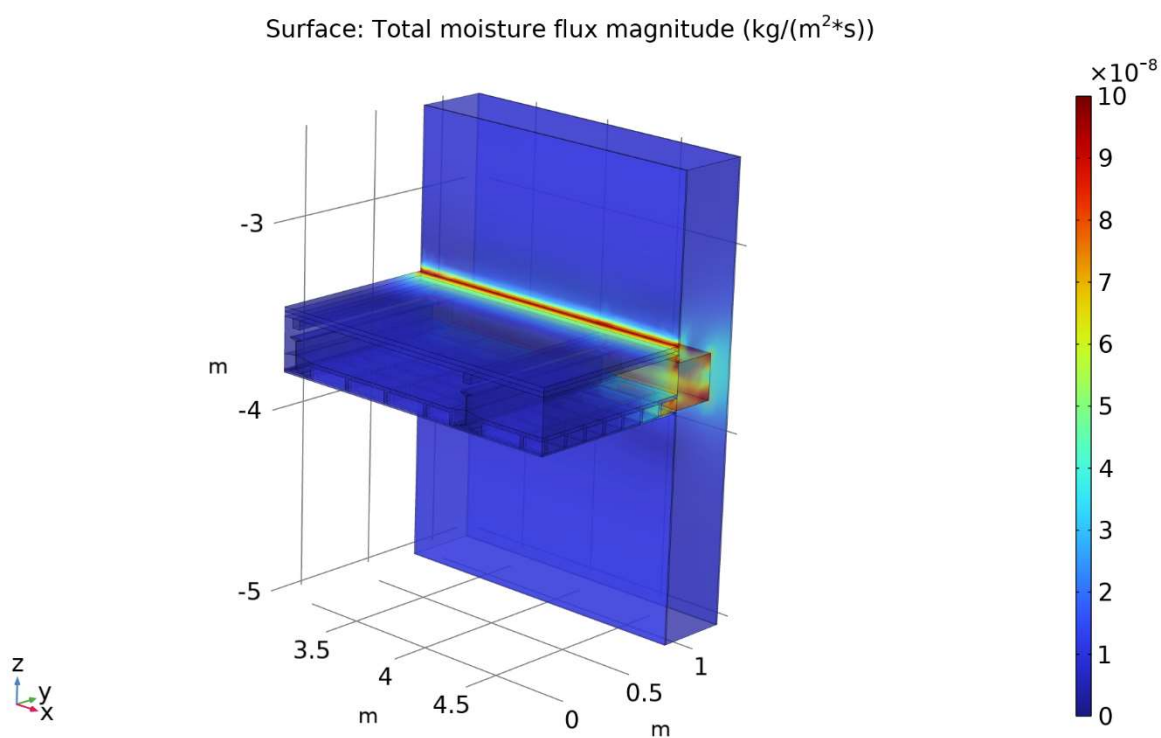
35. ábra: Horcsik-födém teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimulációból



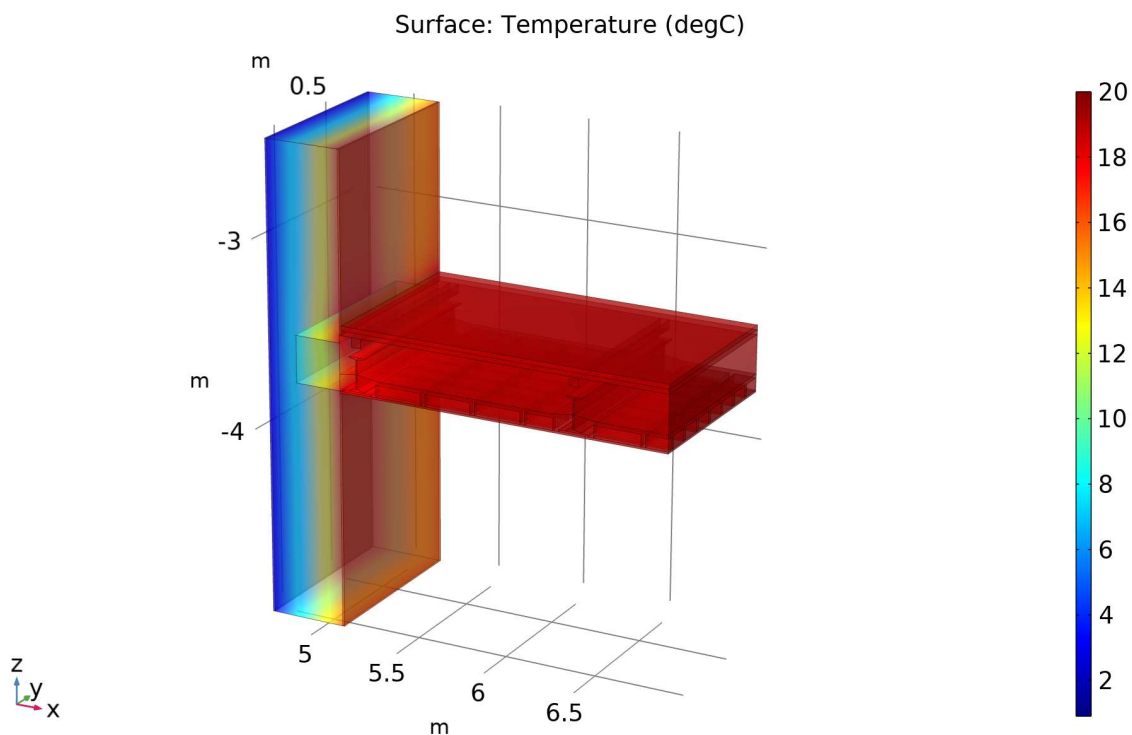
36. ábra: Horcsik-födém teherhordással merőleges irányú hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



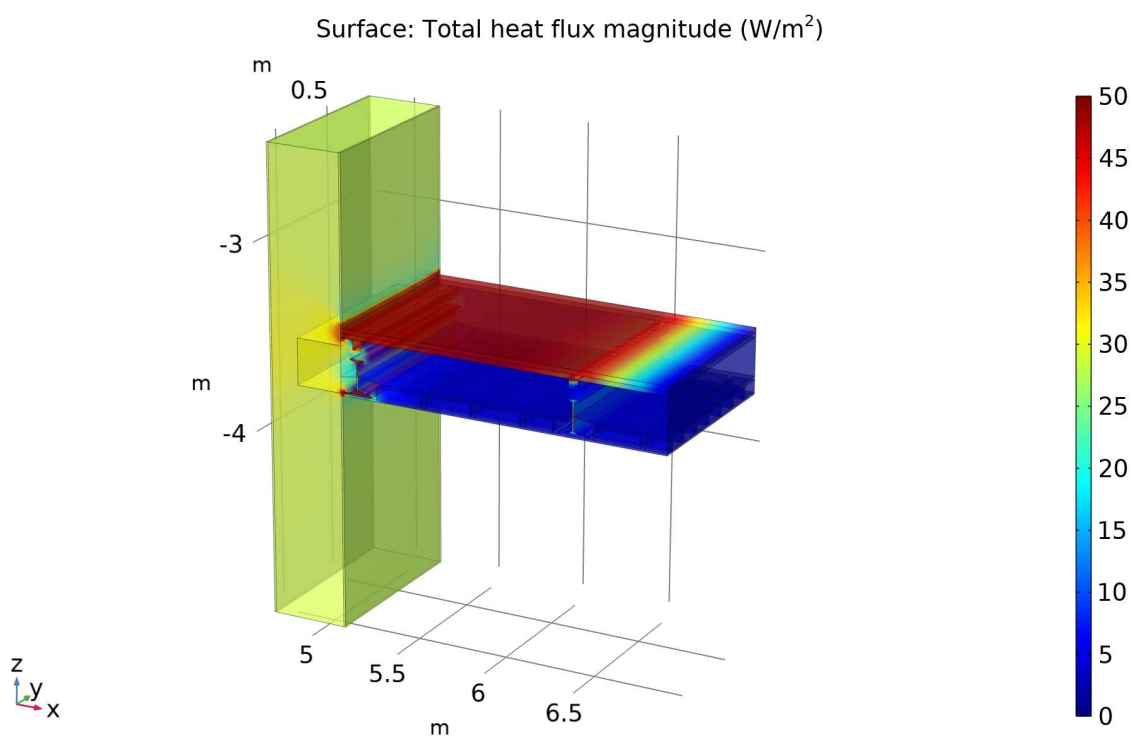
37. ábra: Horcsik-födém teherhordással merőleges irányú relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimulációból



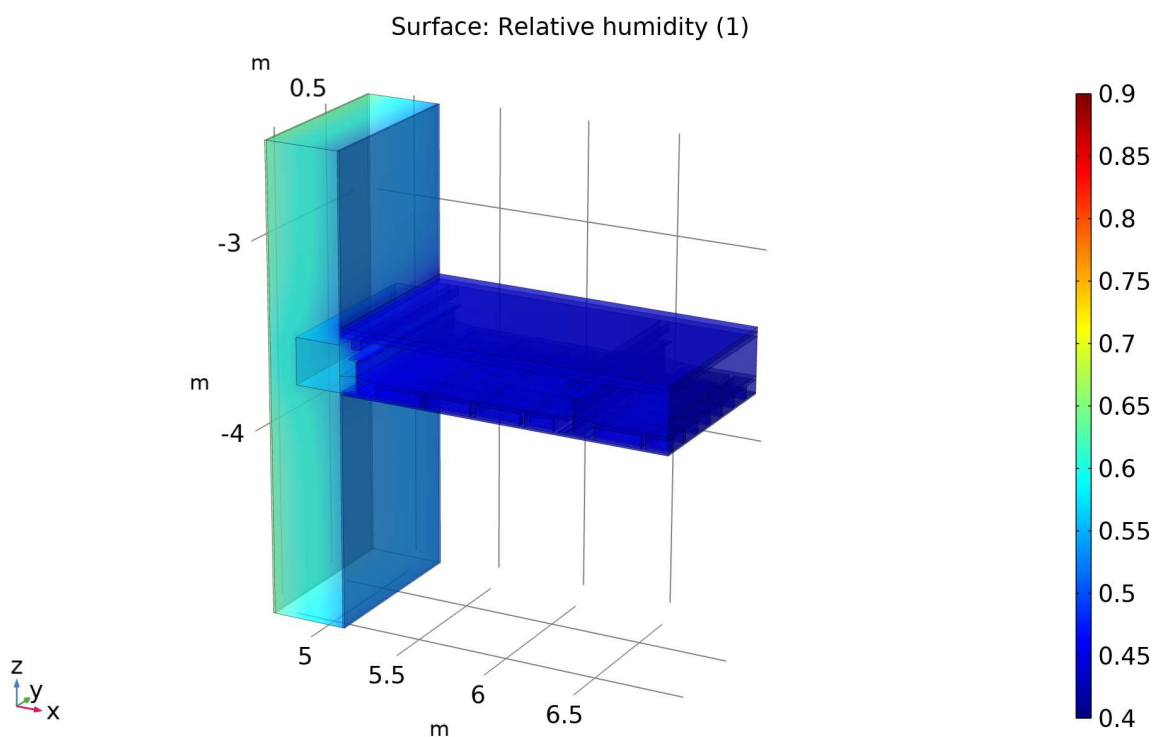
38. ábra: Horcsik-födém teherhordással merőleges irányú nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



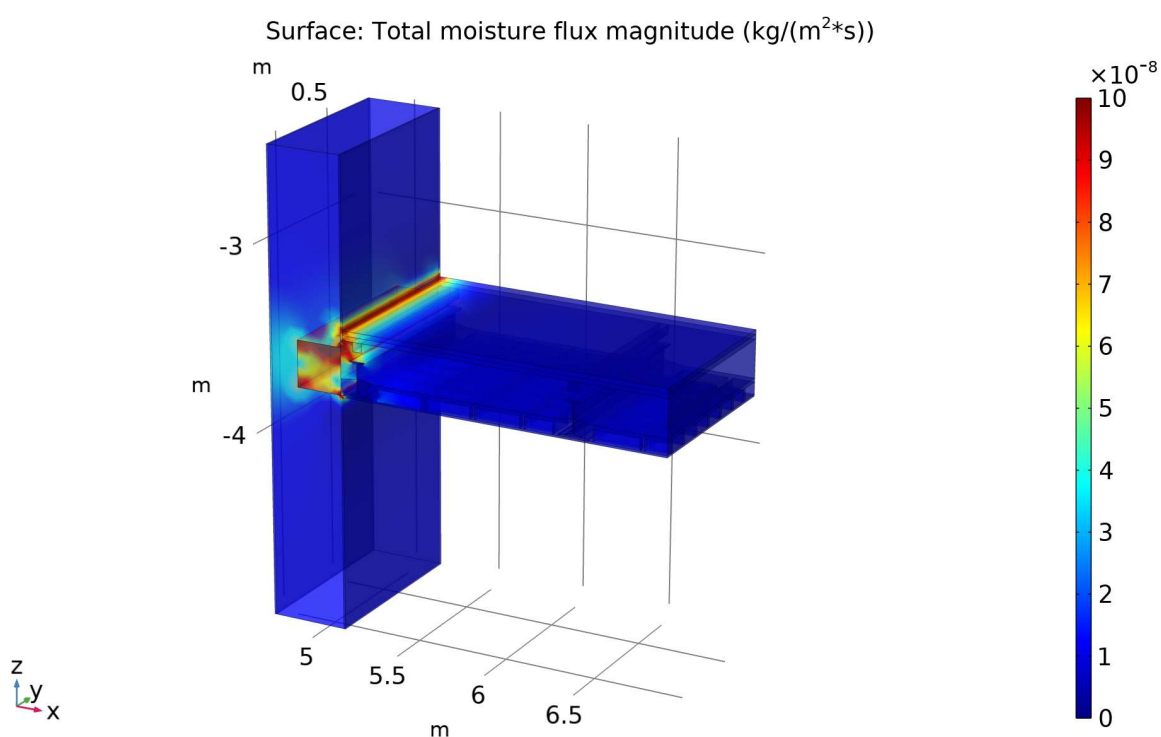
39. ábra: Horcsik-födém teherhordással párhuzamos irányú hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimulációból



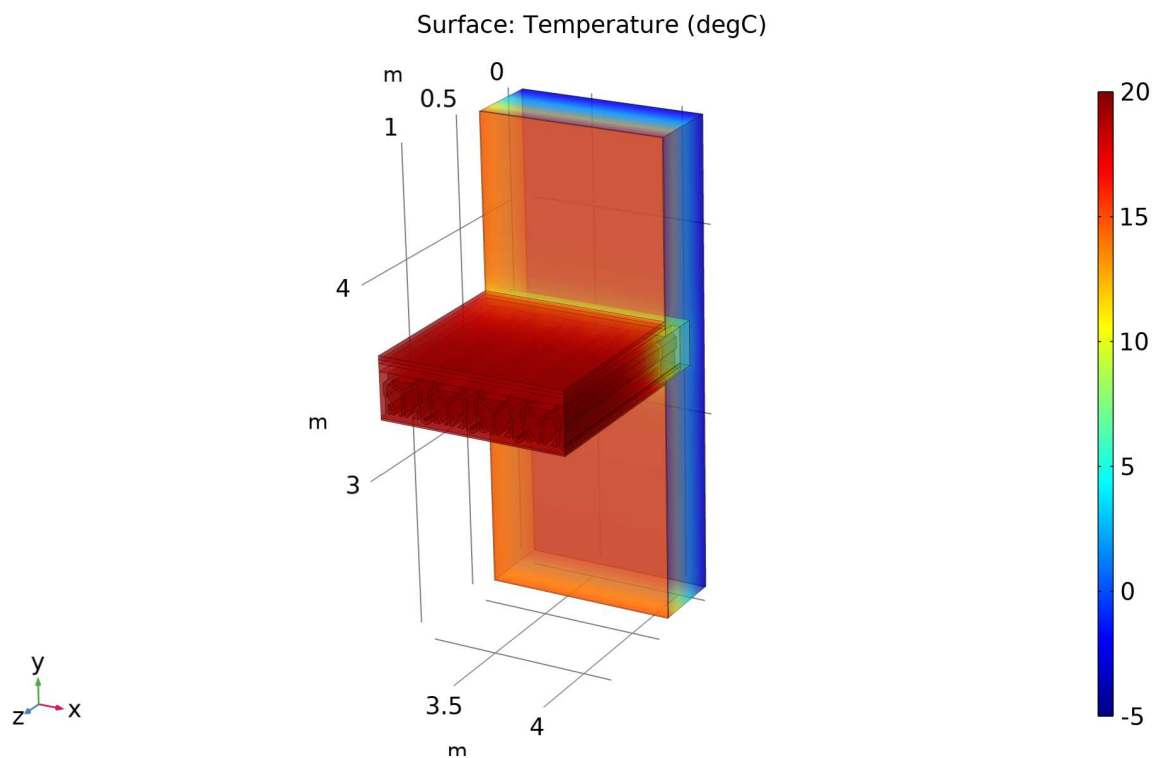
40. ábra: Horcsik-födém teherhordással merőleges irányú hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



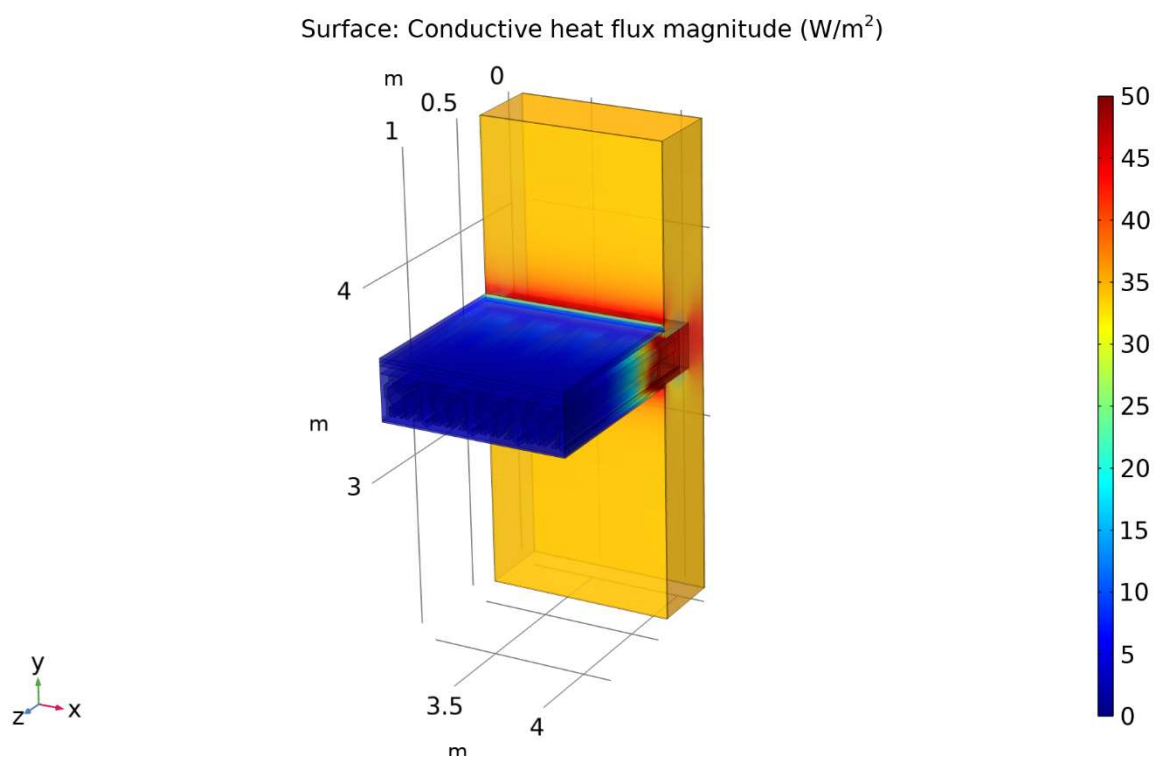
41. ábra: Horcsik-födém teherhordással merőleges irányú relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimulációból



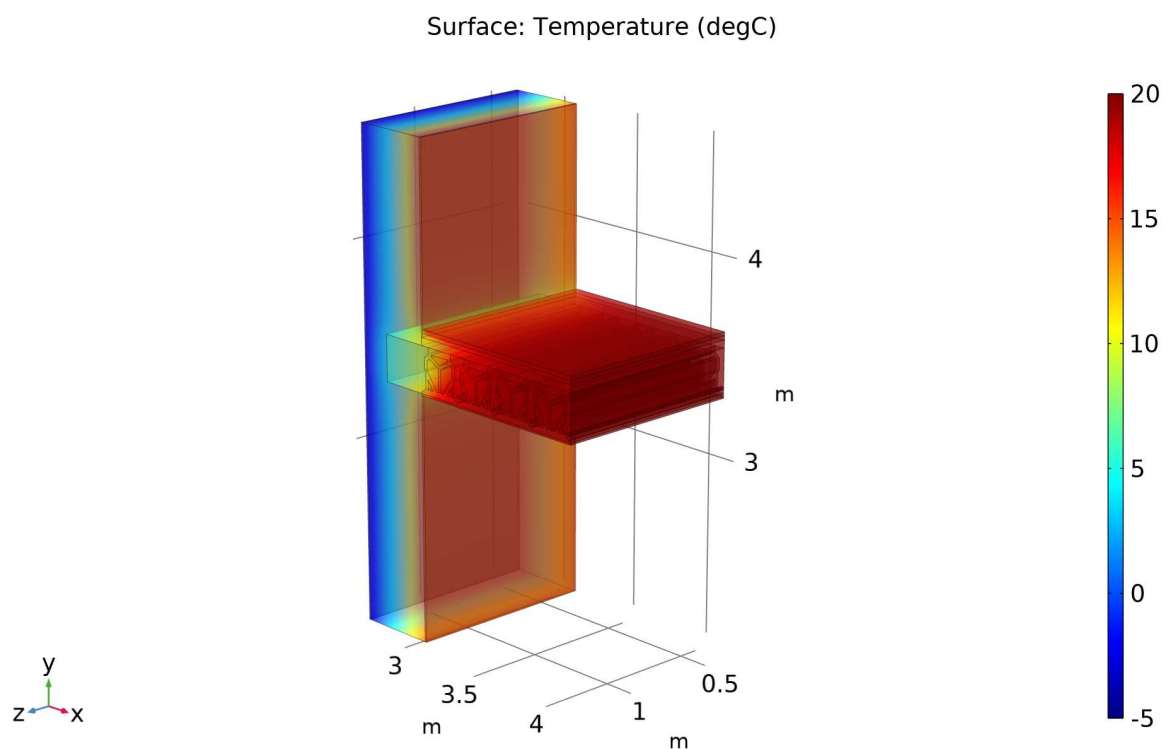
42. ábra: Horcsik-födém teherhordással merőleges irányú nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



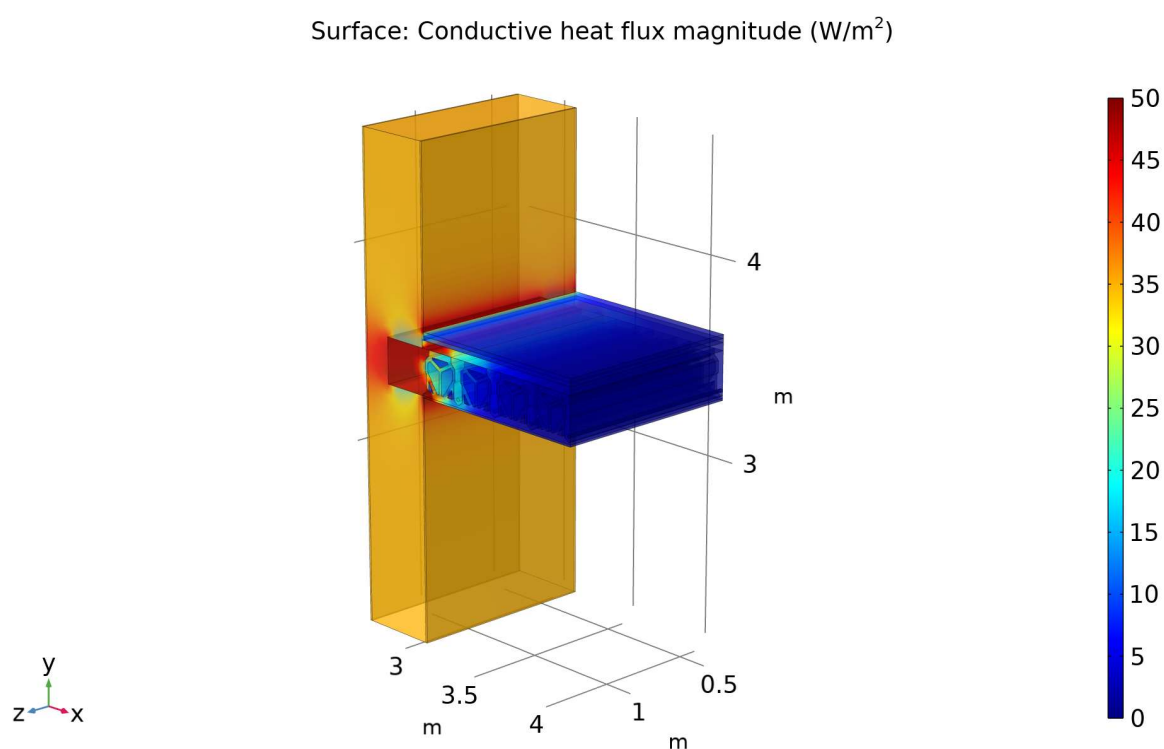
43. ábra: Bohn-födém teherhordással párhuzamos irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



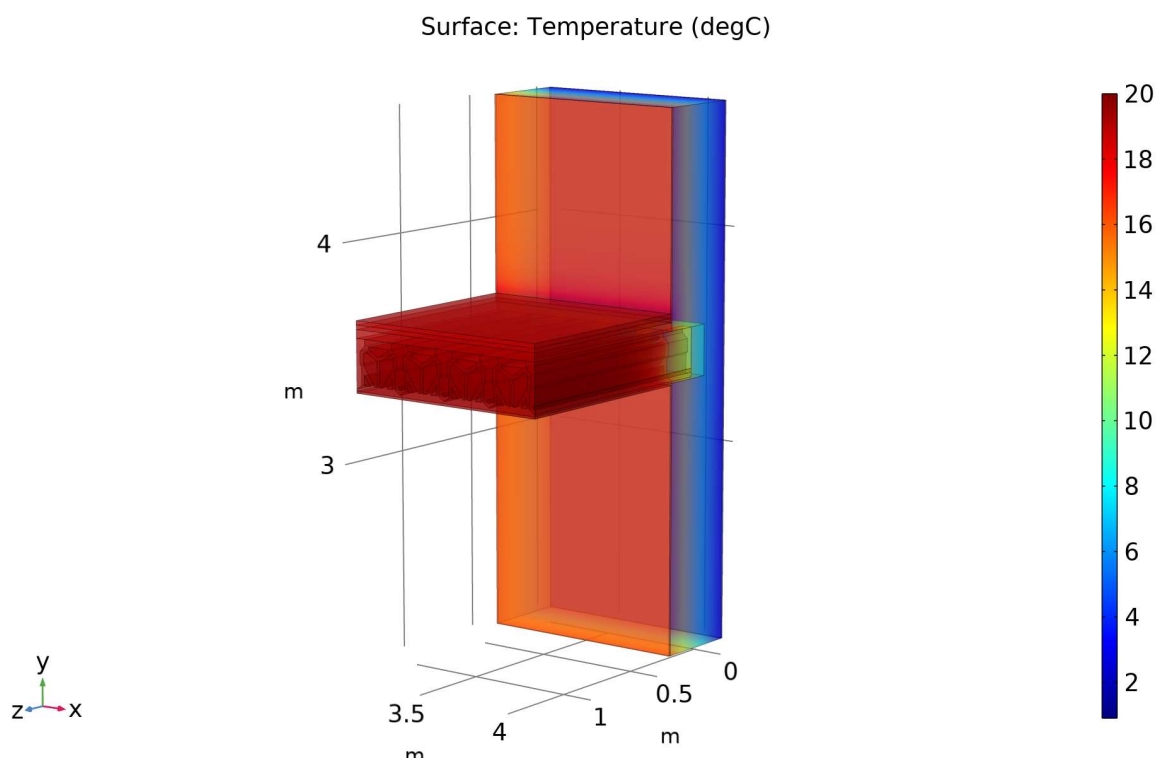
44. ábra: Bohn-födém teherhordással párhuzamos irányú hőáramsűrűség eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



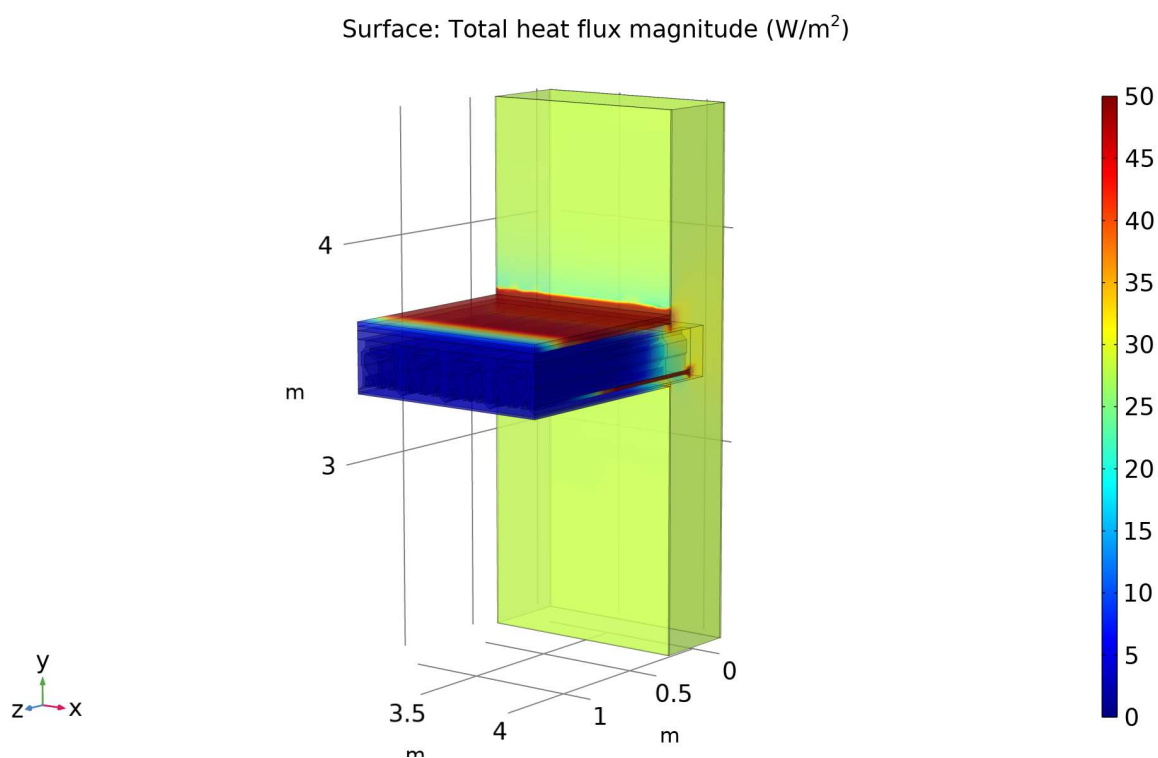
45. ábra: Bohn-födém teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



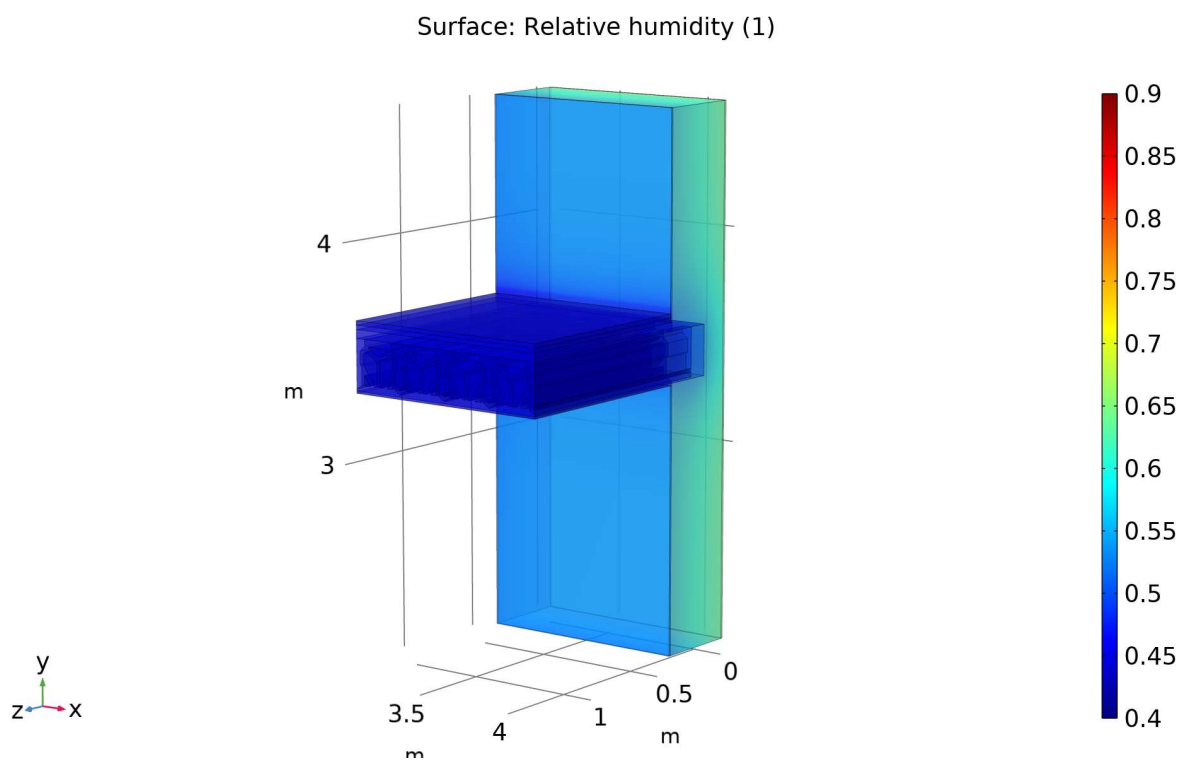
46. ábra: Bohn-födém teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



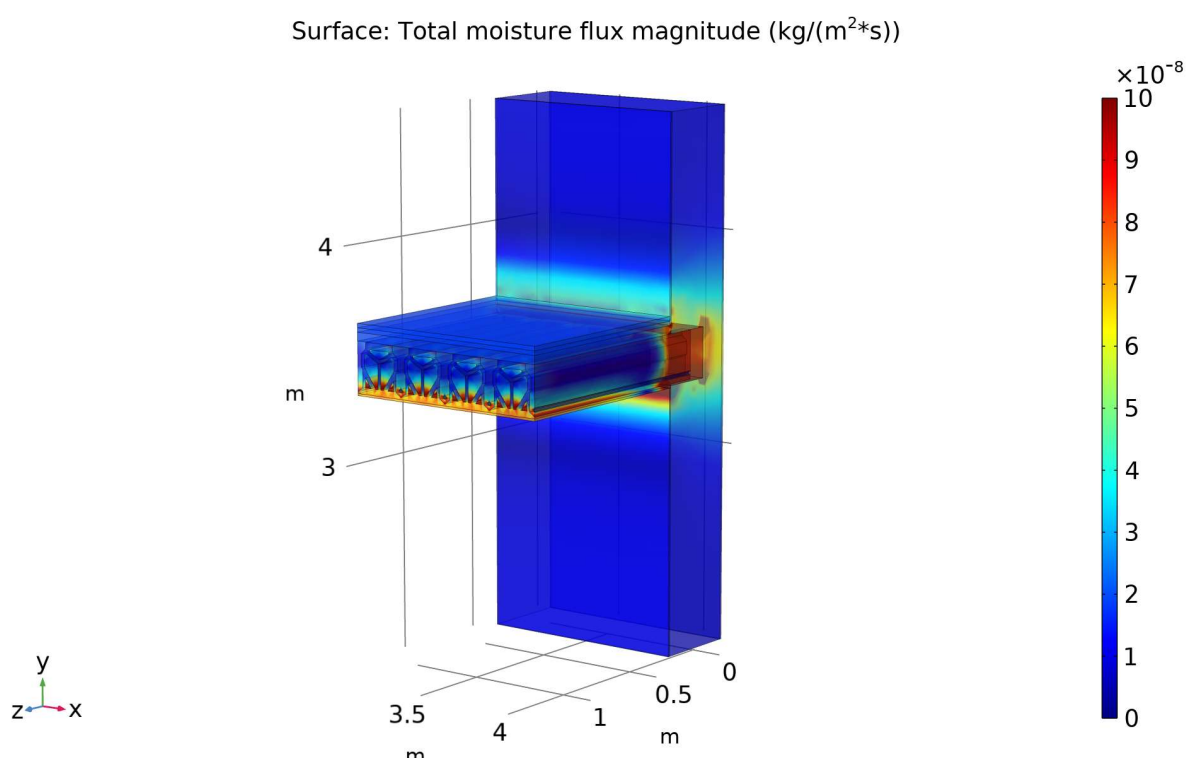
47. ábra: Bohn-födém teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimulációból



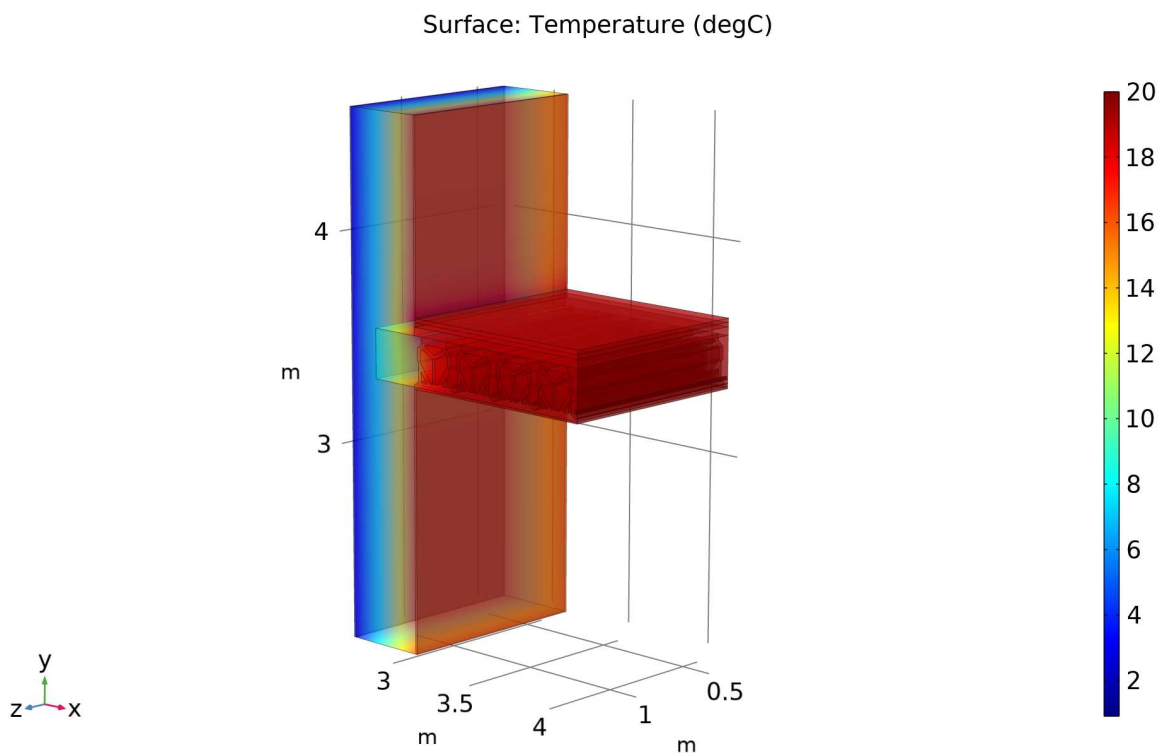
48. ábra: Bohn-födém teherhordással merőleges irányú hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



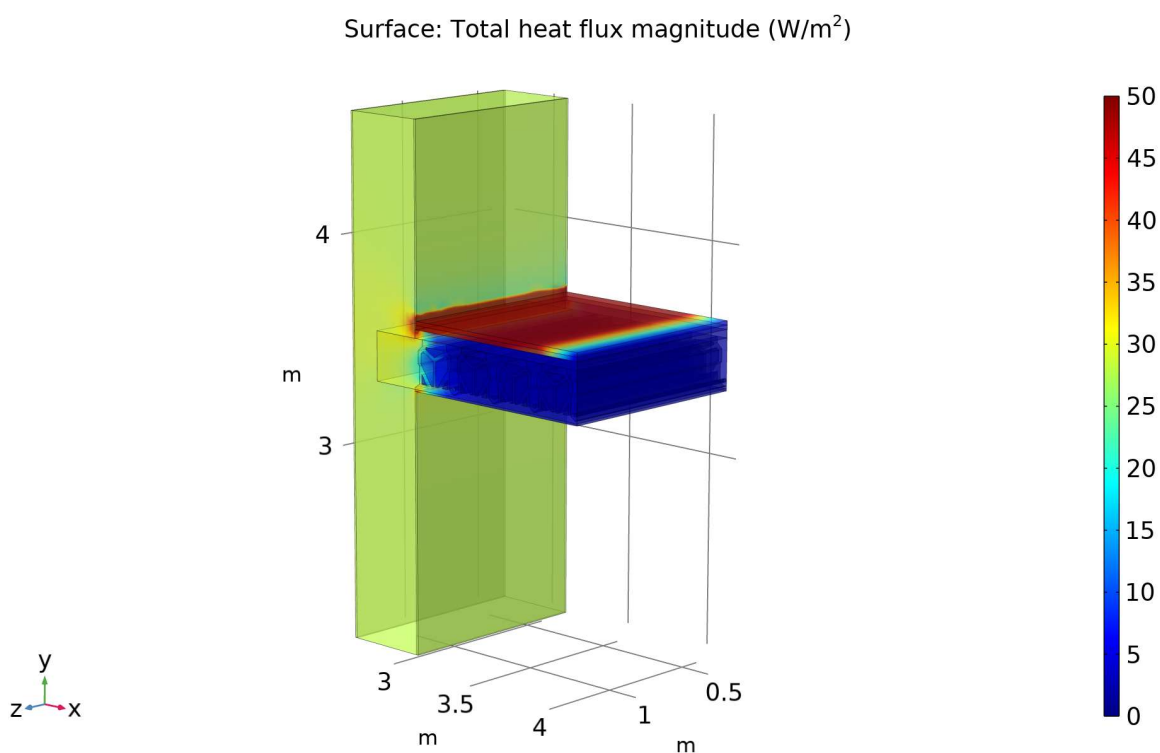
49. ábra: Bohn-födém teherhordással merőleges irányú relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimulációból



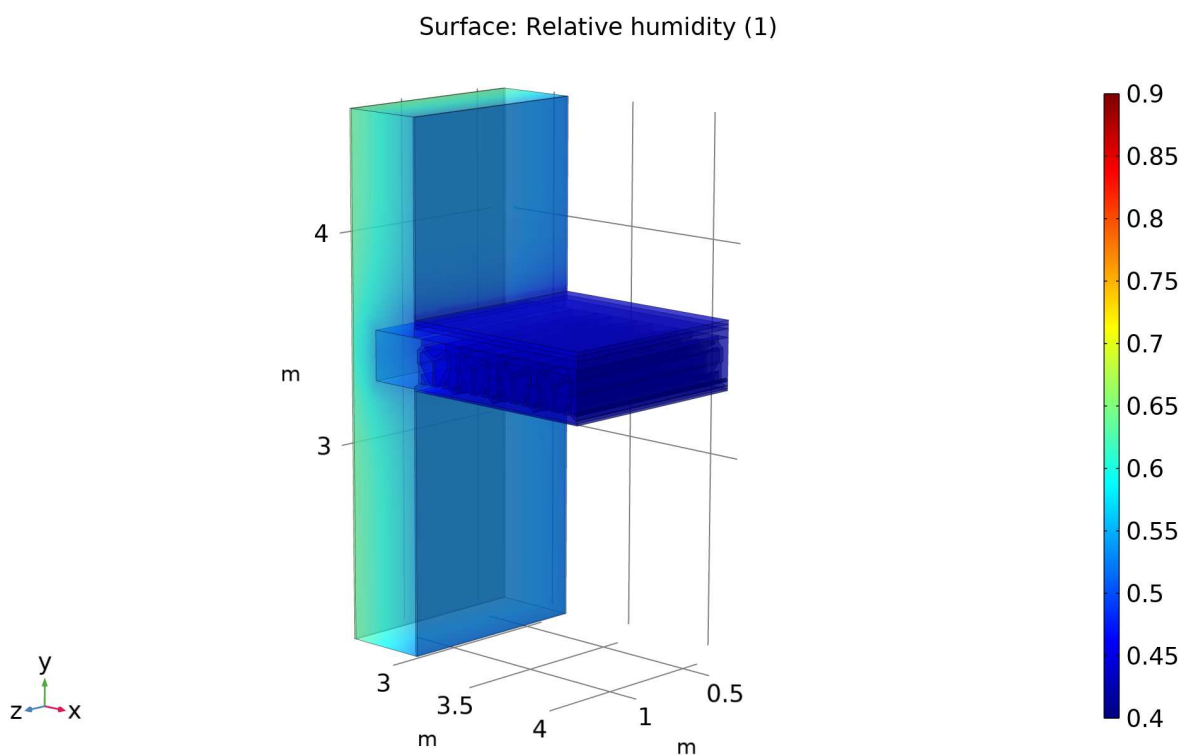
50. ábra: Bohn-födém teherhordással merőleges irányú nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



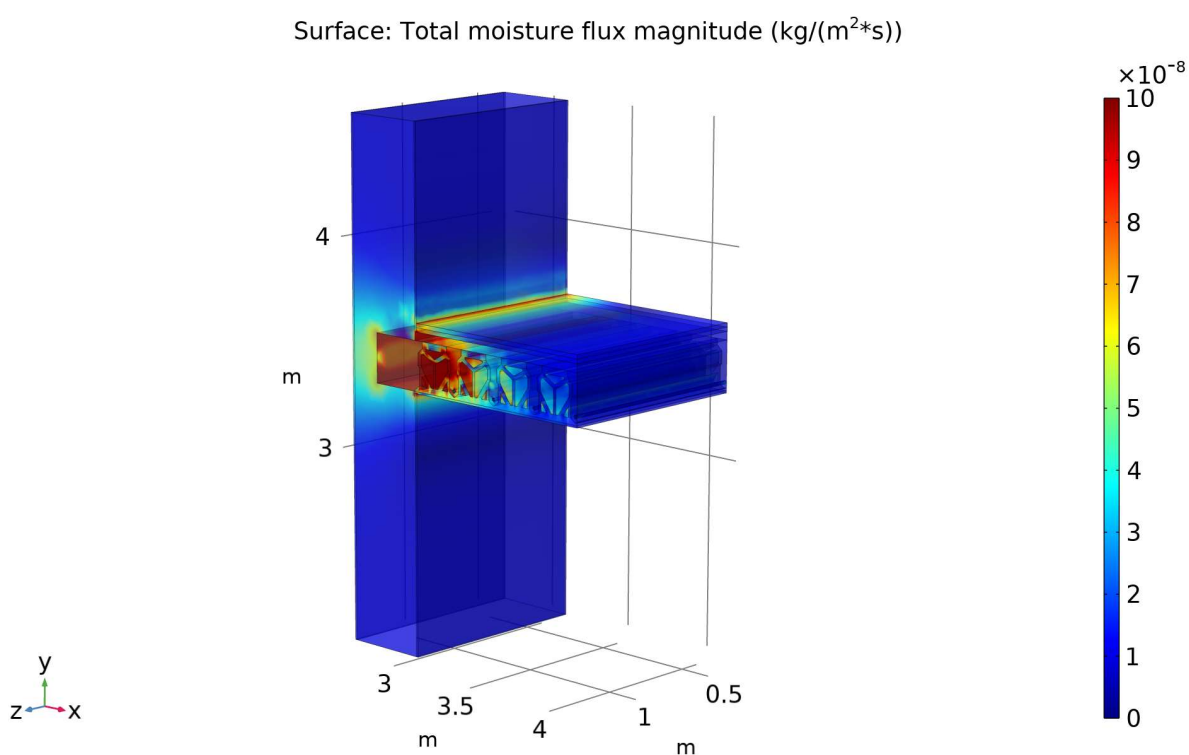
51. ábra: Bohn-födém teherhordással párhuzamos irányú hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimulációból



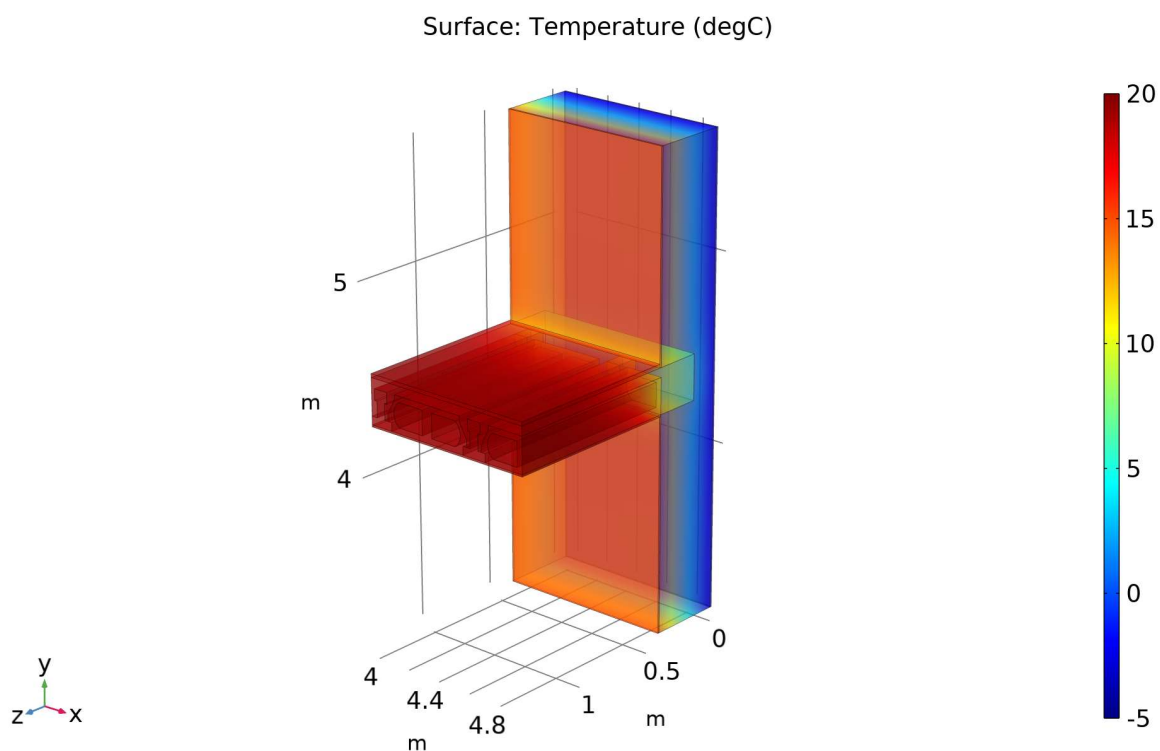
52. ábra: Bohn-födém teherhordással merőleges irányú hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



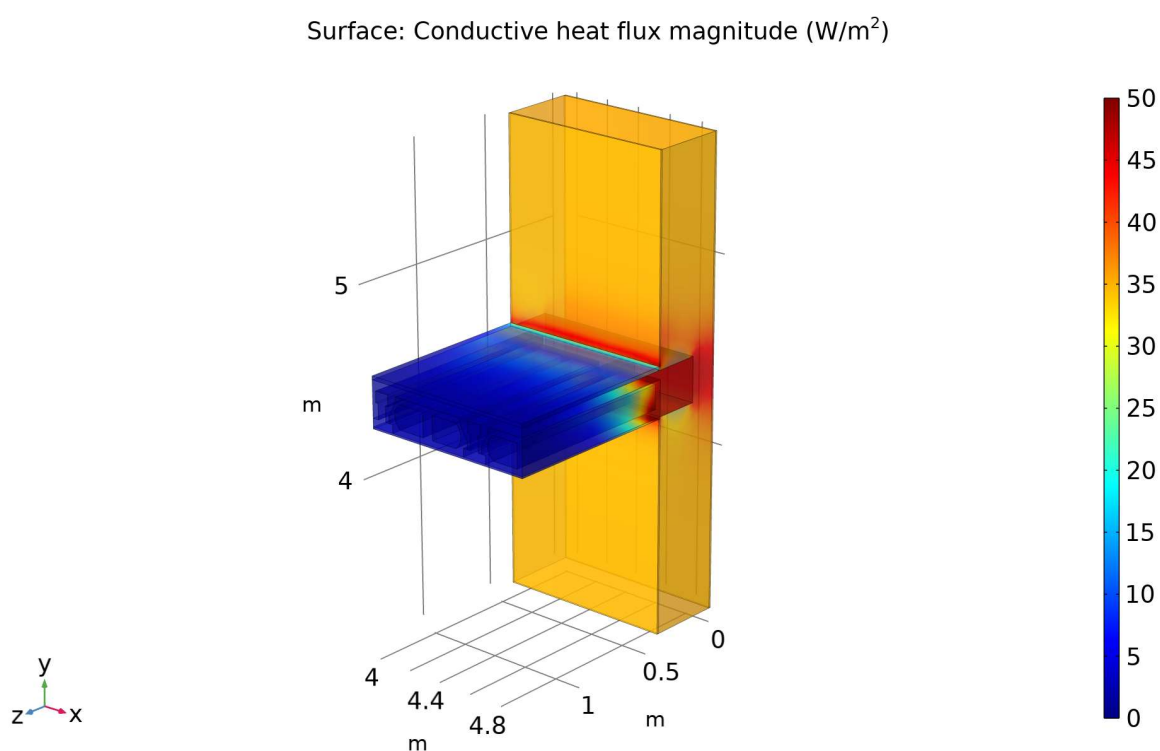
53. ábra: Bohn-födém teherhordással merőleges irányú relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimulációból



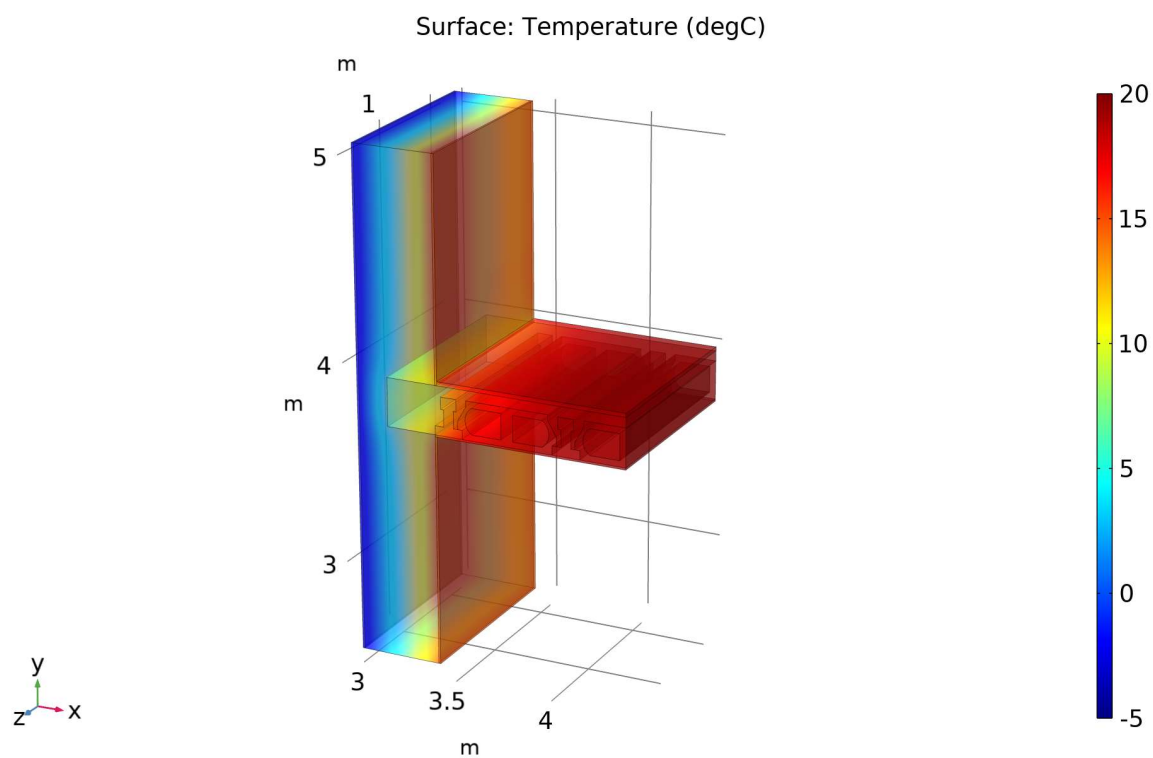
54. ábra: Bohn-födém teherhordással merőleges irányú nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



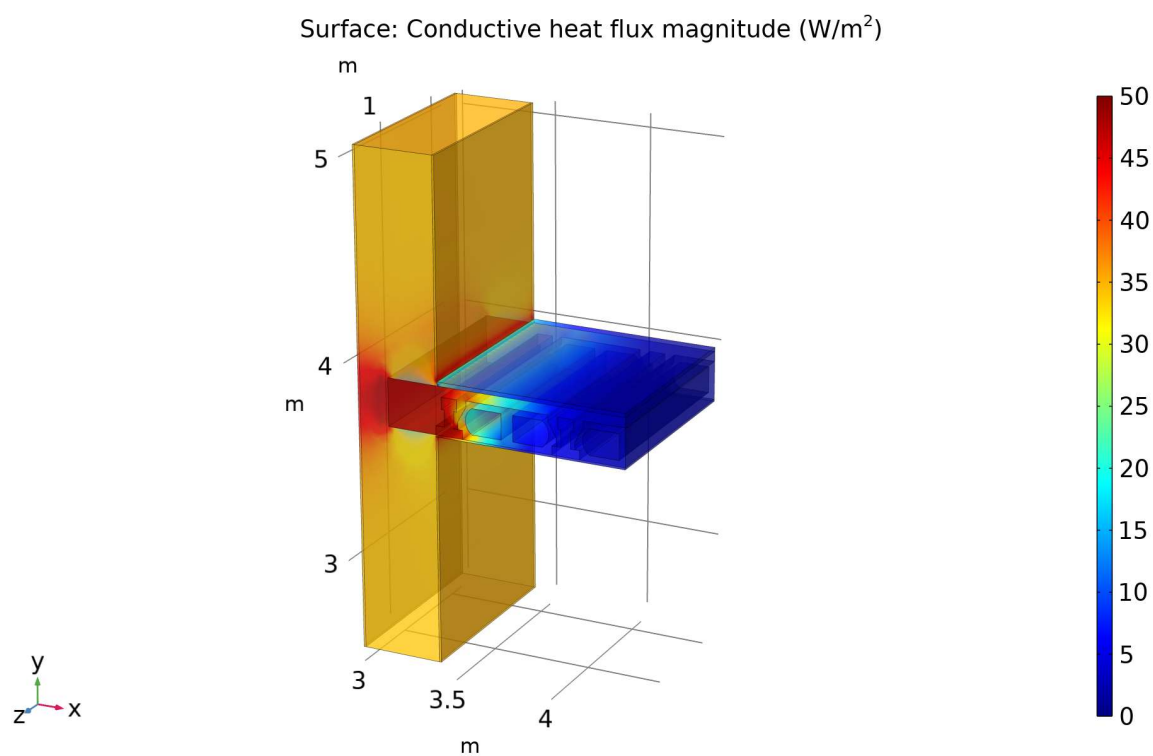
55. ábra: Bohn-födém teherhordással párhuzamos irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



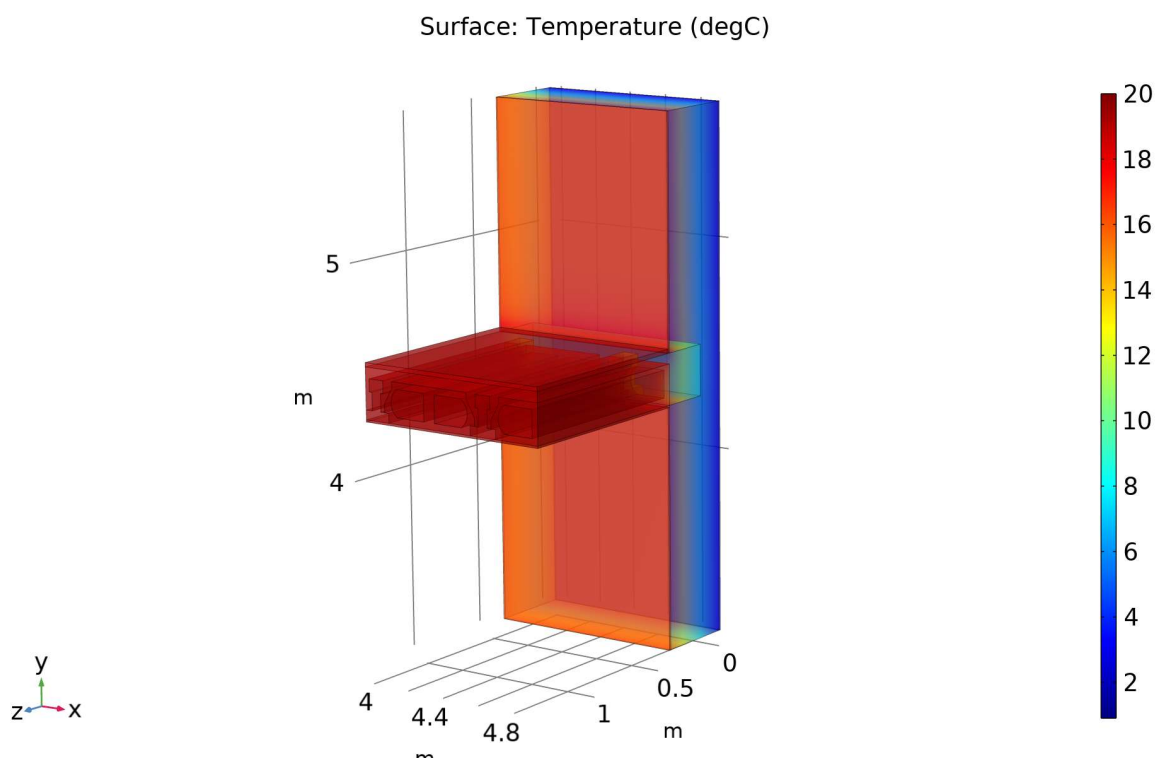
56. ábra: Bohn-födém teherhordással párhuzamos irányú hőáramsűrűség eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



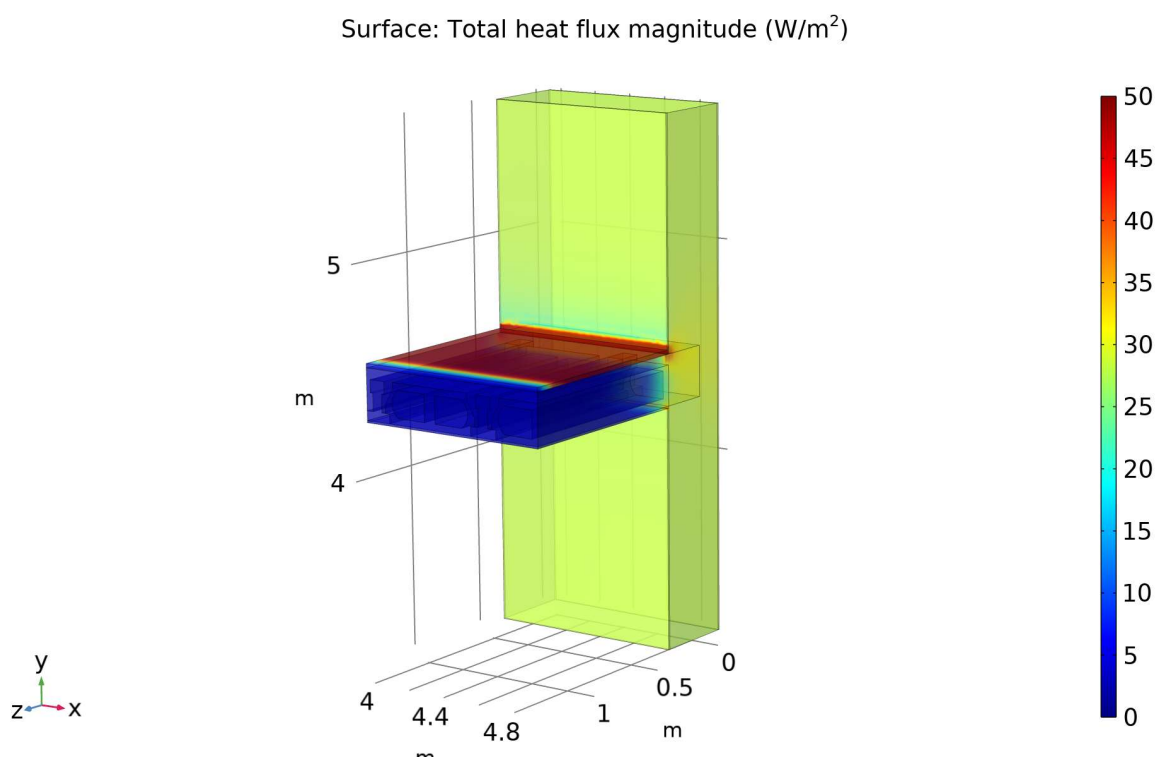
57. ábra: E-gerendás földem teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



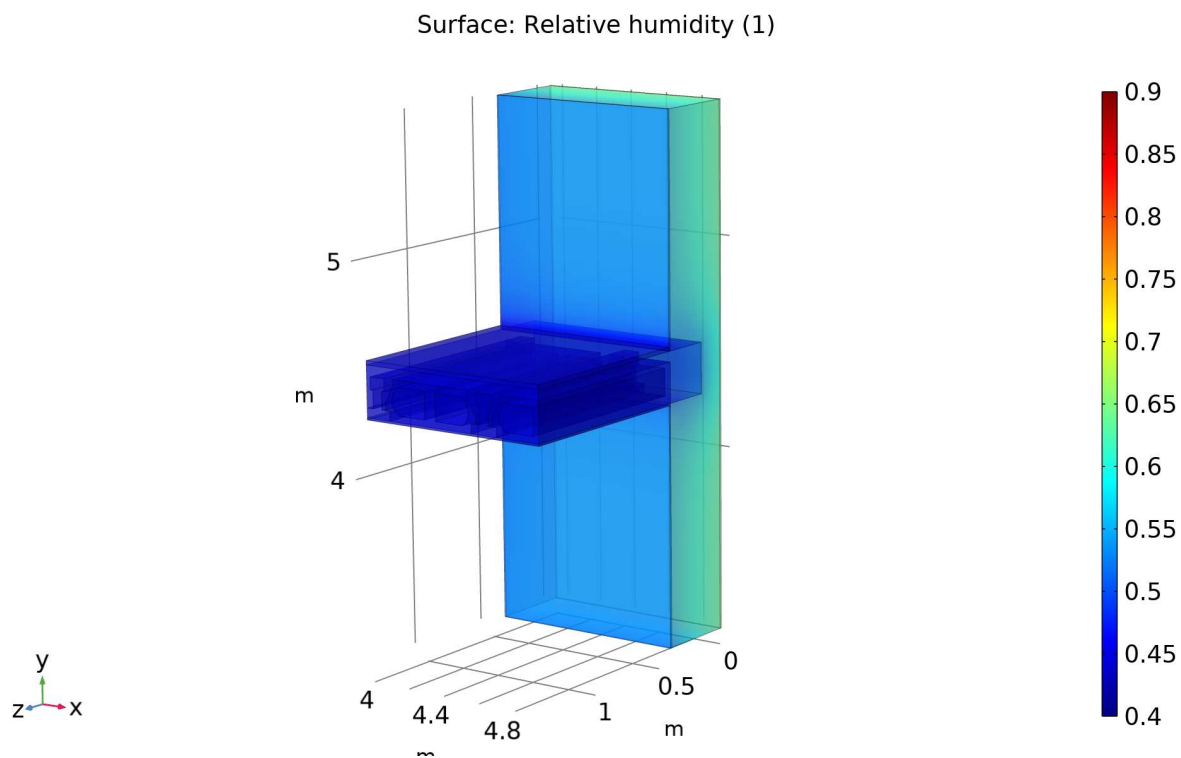
58. ábra: E-gerendás teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimulációból



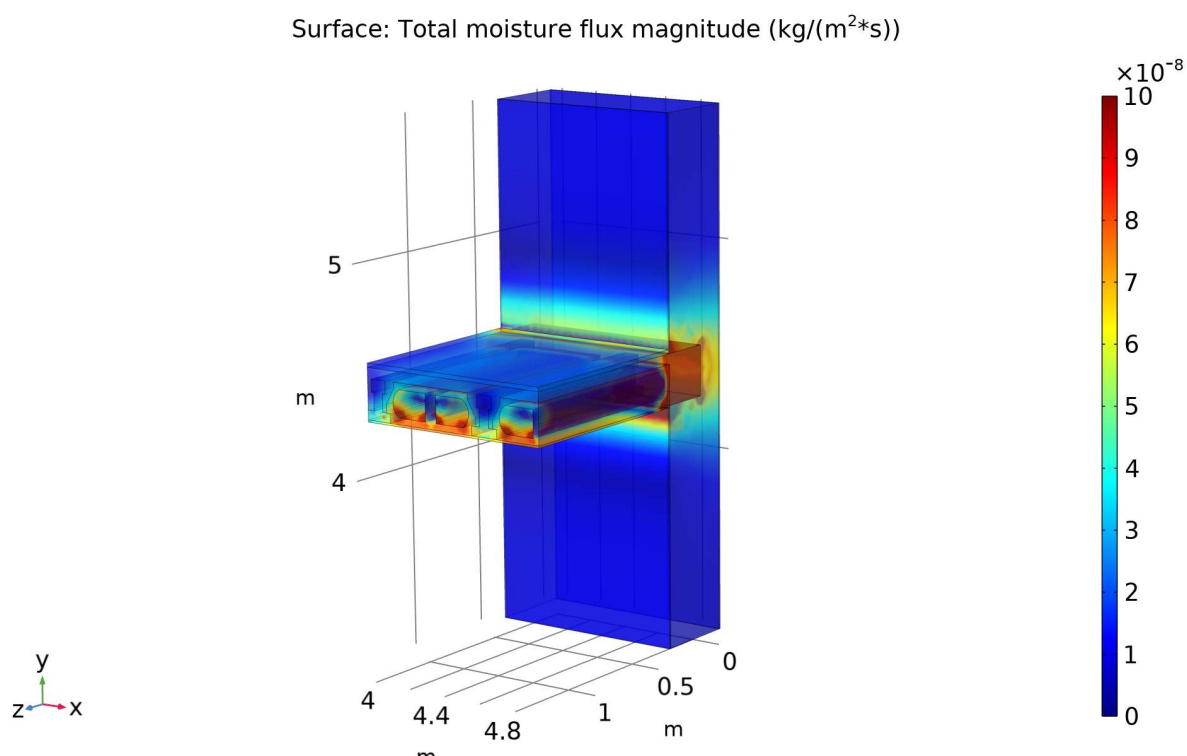
59. ábra: E-gerendás teherhordással merőleges irányú hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimulációból



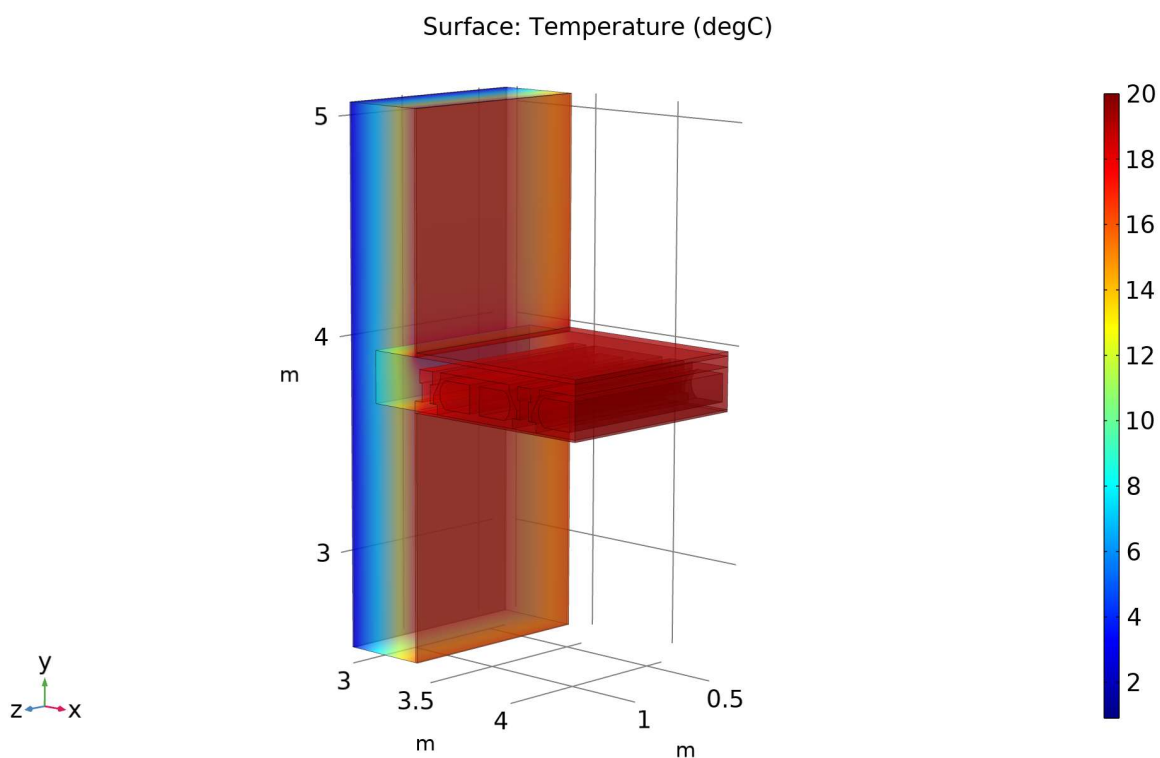
60. ábra: E-gerendás földem teherhordással merőleges irányú hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



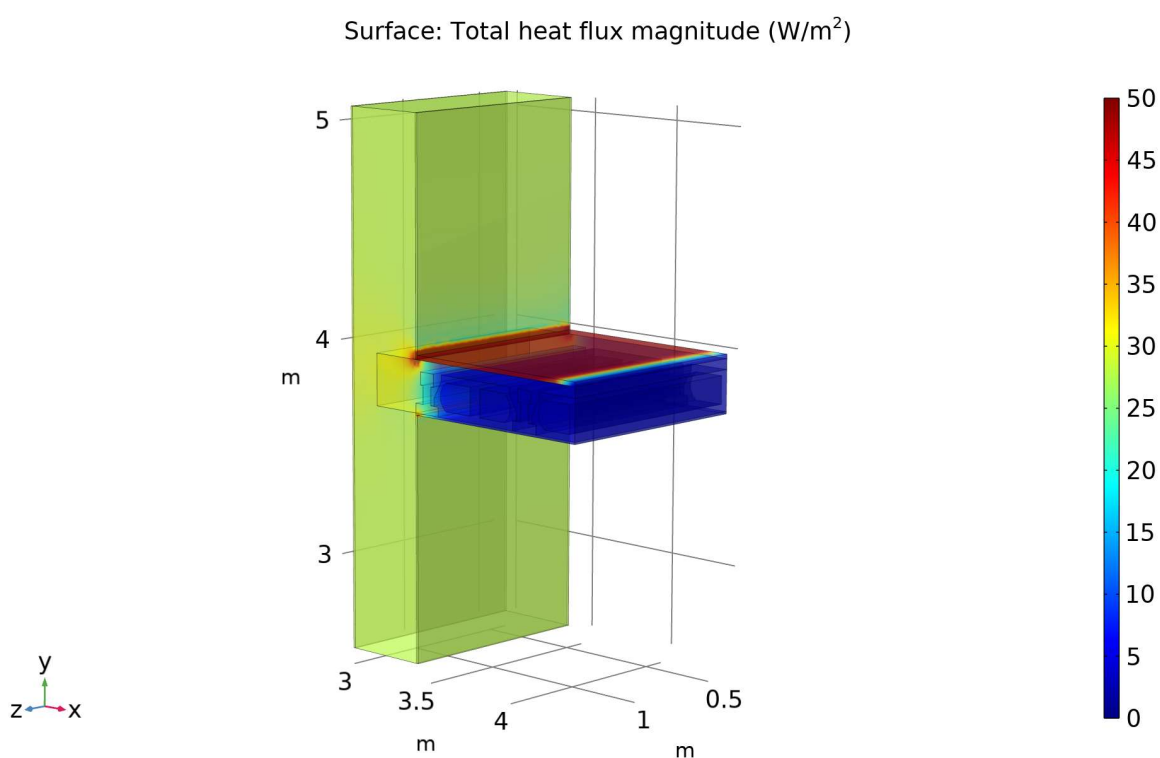
61. ábra: E-gerendás födém teherhordással merőleges irányú relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimulációból



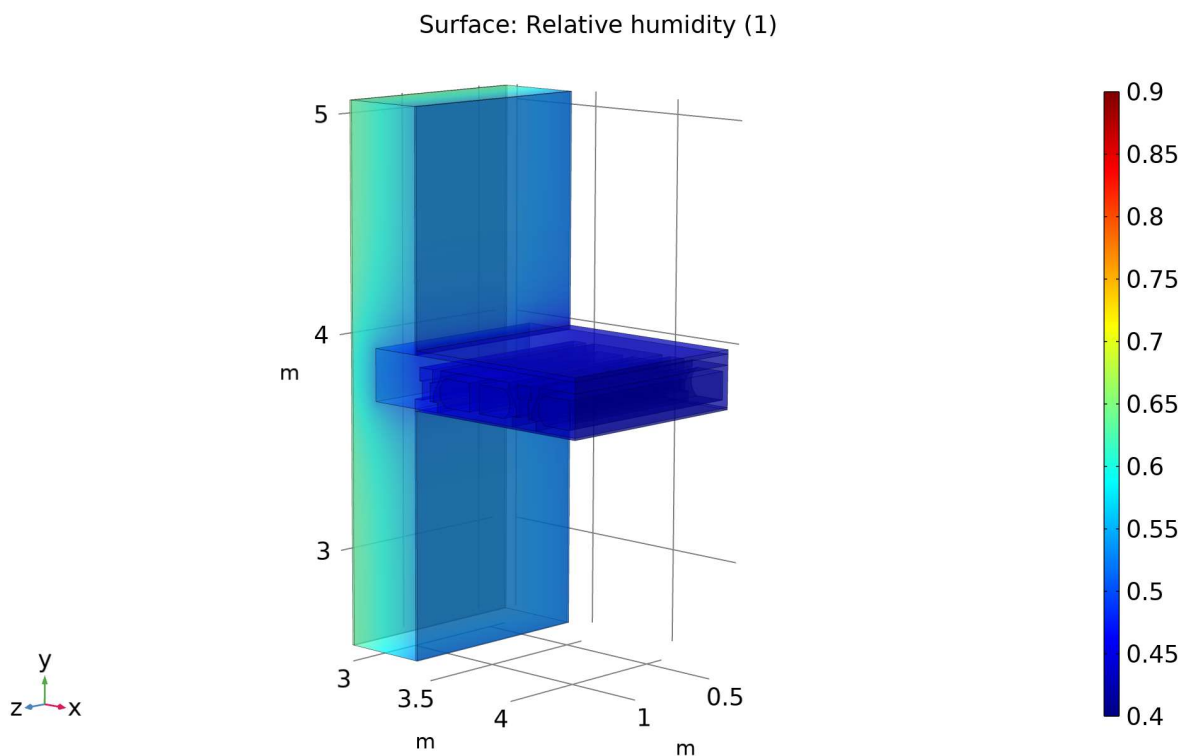
62. ábra: E-gerendás födém teherhordással merőleges irányú nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



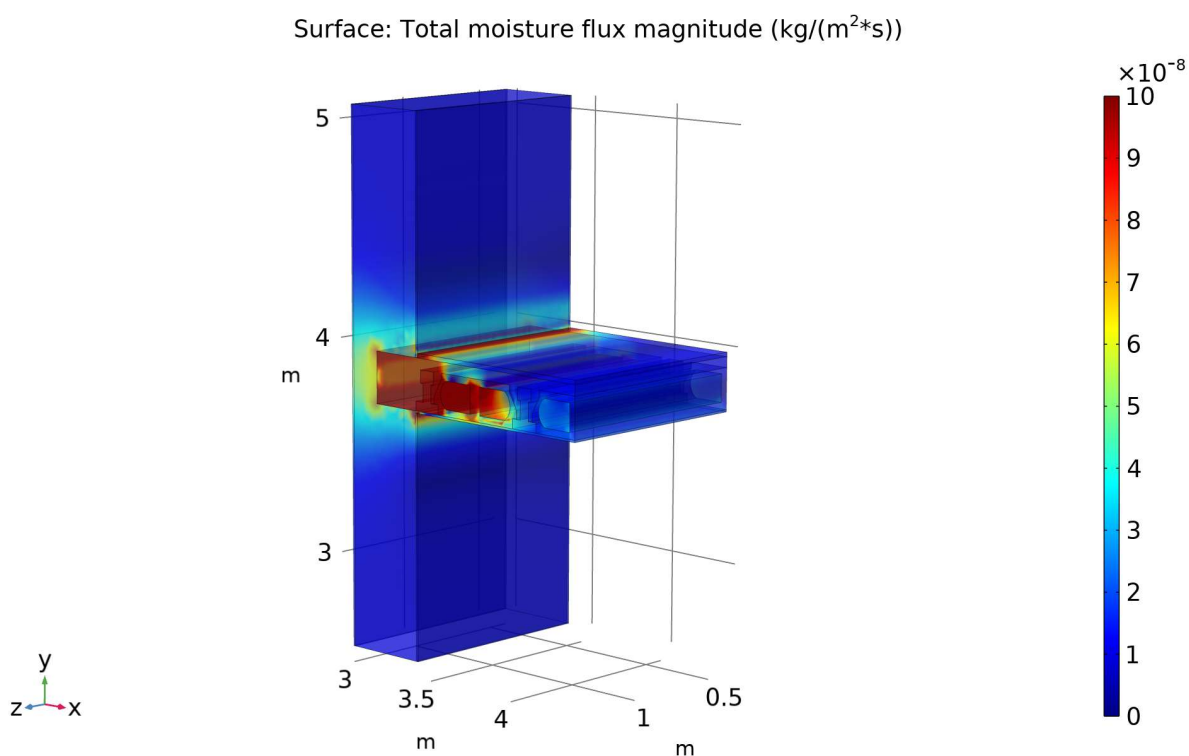
63. ábra: E-gerendás födém teherhordással párhuzamos irányú hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimulációból



64. ábra: E-gerendás födém teherhordással merőleges irányú hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból



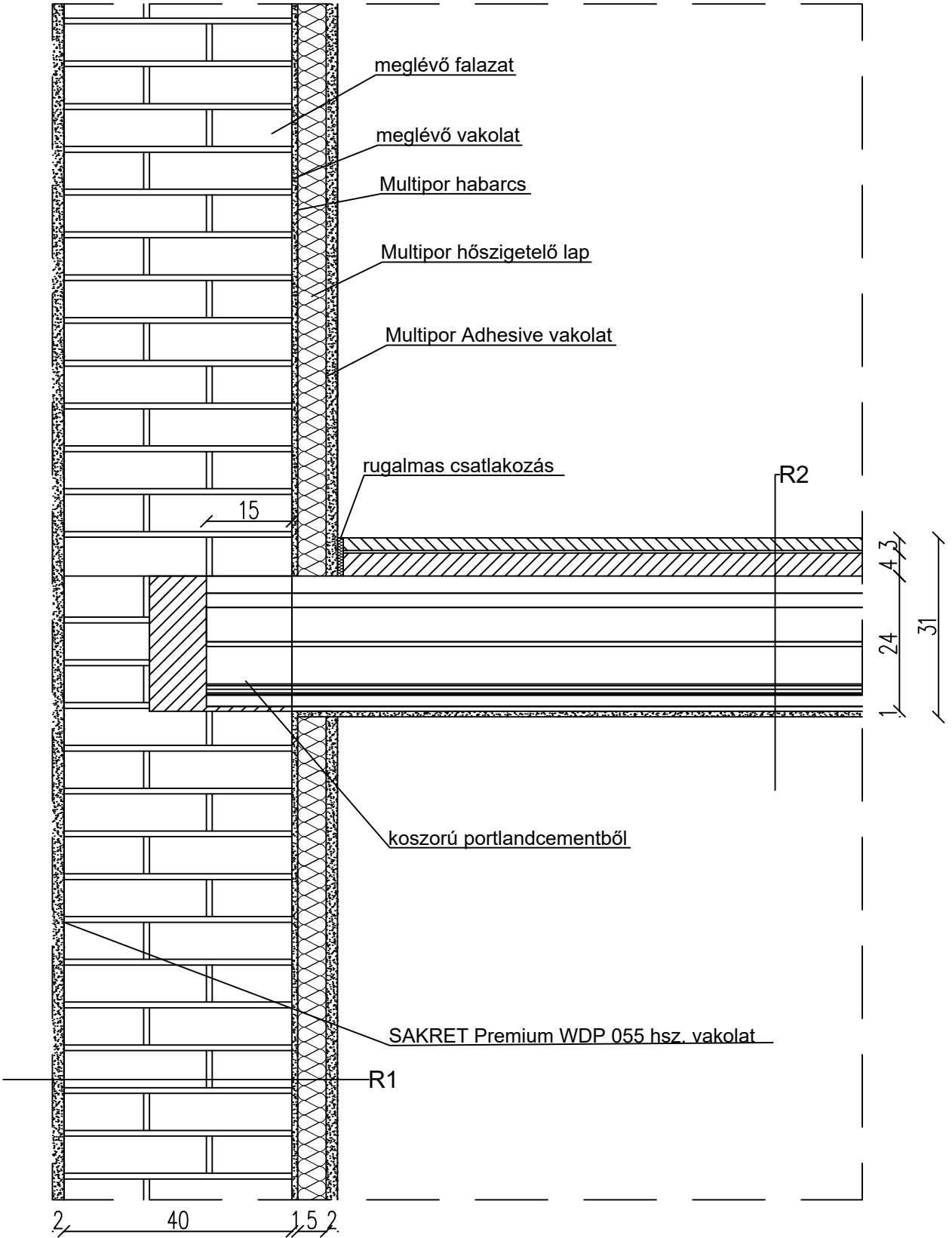
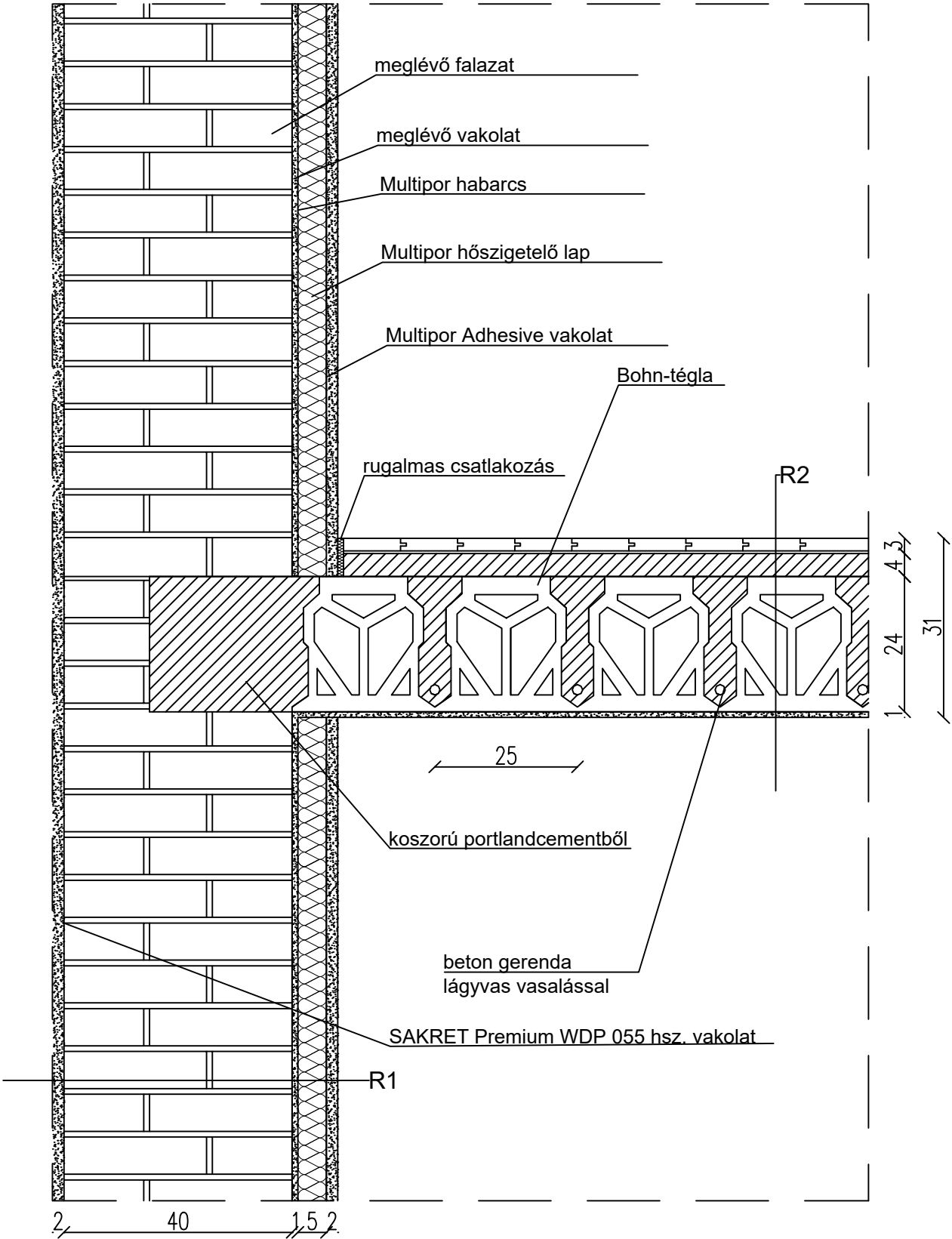
65. ábra: E-gerendás földem teherhordással merőleges irányú relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimulációból



66. ábra: E-gerendás földem teherhordással merőleges irányú nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimulációból

Rajzi mellékletek

Bohn-födém felújítási opció: 5 cm belső oldali Multipor hőszigetelés külső oldalon 2 cm hőszigetelő vakolattal

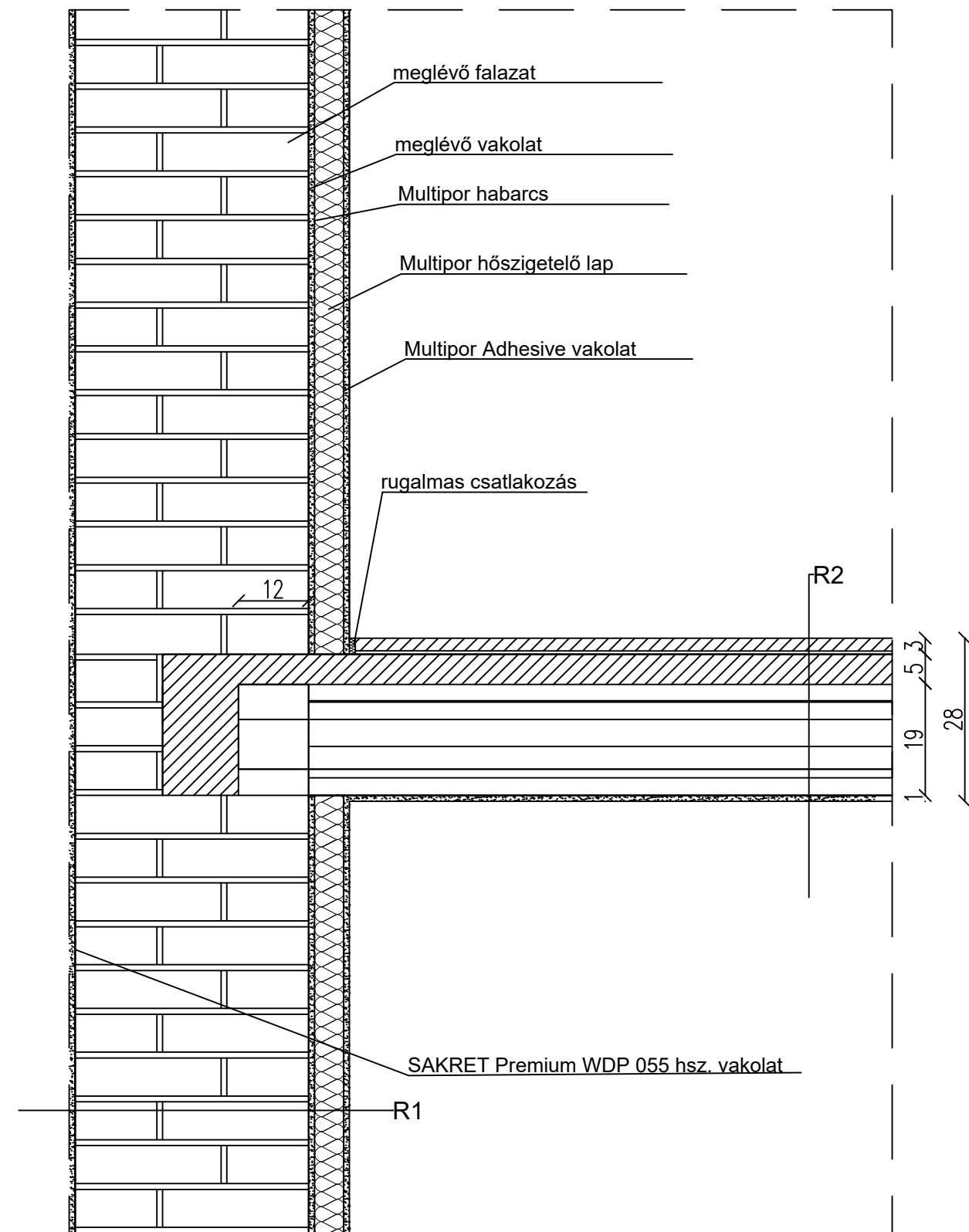
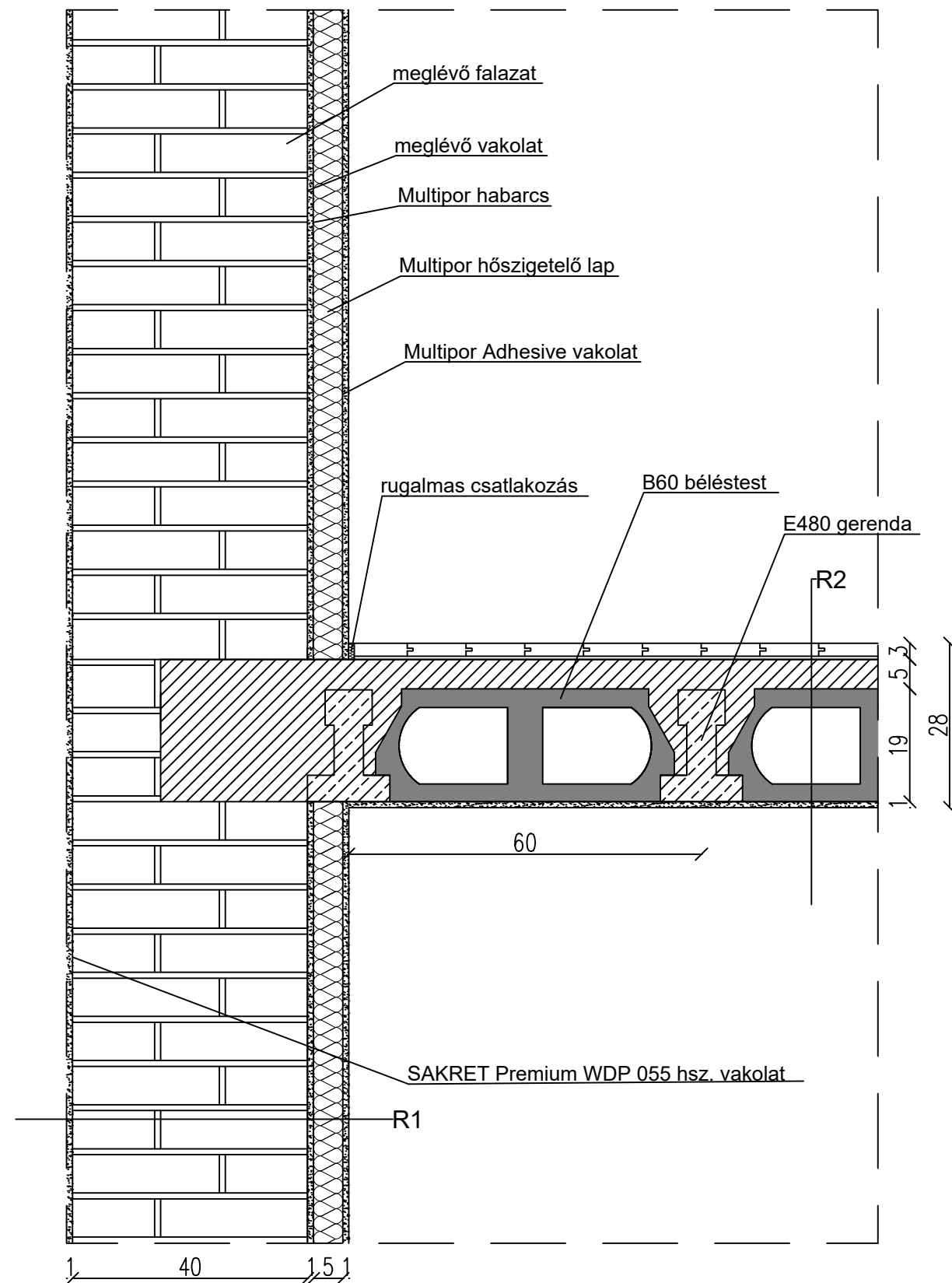


R1 külső fal rétegrend
2 cm SAKRET Premium WDP 055 hsz. vakolat
meglévő téglafalazat
1 cm meglévő vakolat
Multipor habarcs/ragasztó
5 cm Multipor hőszigetelő lap
2 cm Multipor Adhesive vakolat

R2 födém rétegrend
1 cm belső vakolat
24 cm Bohn-tégla + beton gerenda 25 cm-ként
4 cm felbeton
3 cm parketta ragasztva

Építőanyagok és Magasépítés TSZ.	
MSc Diplomamunka 2022/2023/I	CS01
Bohn-födém felújított rétegrend	M= 1:10

E-gerendás födém felújítási opció: 5 cm belső oldali Multipor hőszigetelés külső oldalon 1 cm hőszigetelő vakolattal



R1 külső fal rétegrend

1 cm SAKRET Premium WDP 055 hsz. vakolat
40 cm meglévő téglafalazat
1 cm meglévő vakolat
Multipor habarcs/ragasztó
5 cm Multipor hőszigetelő lap
1 cm Multipor Adhesive vakolat

R2 födém rétegrend

1 cm belső vakolat
19 cm E480 egy.gerenda közte B60 béléstest
5 cm felbeton
3 cm parketta ragasztva

Építőanyagok és Magasépítés TSZ.

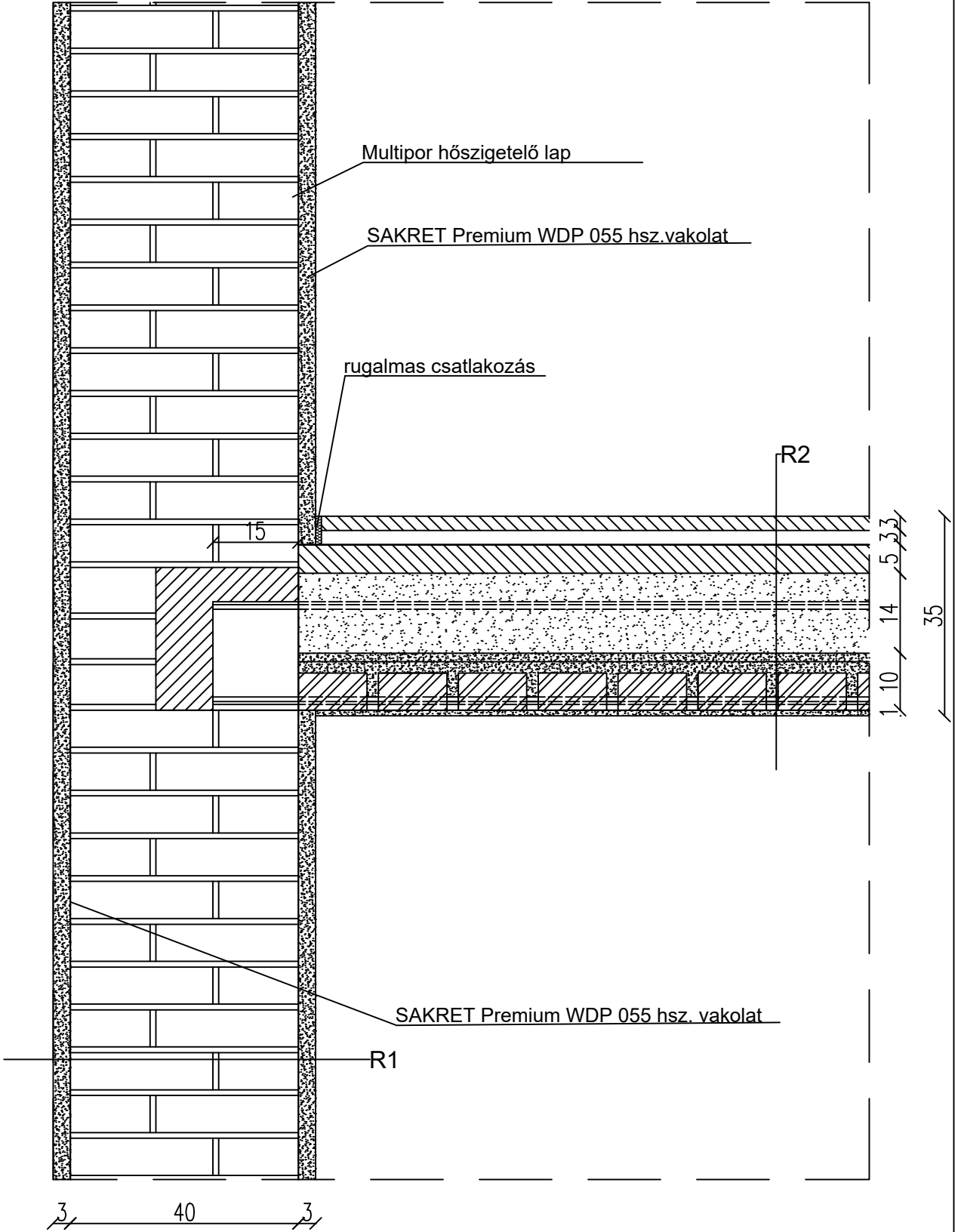
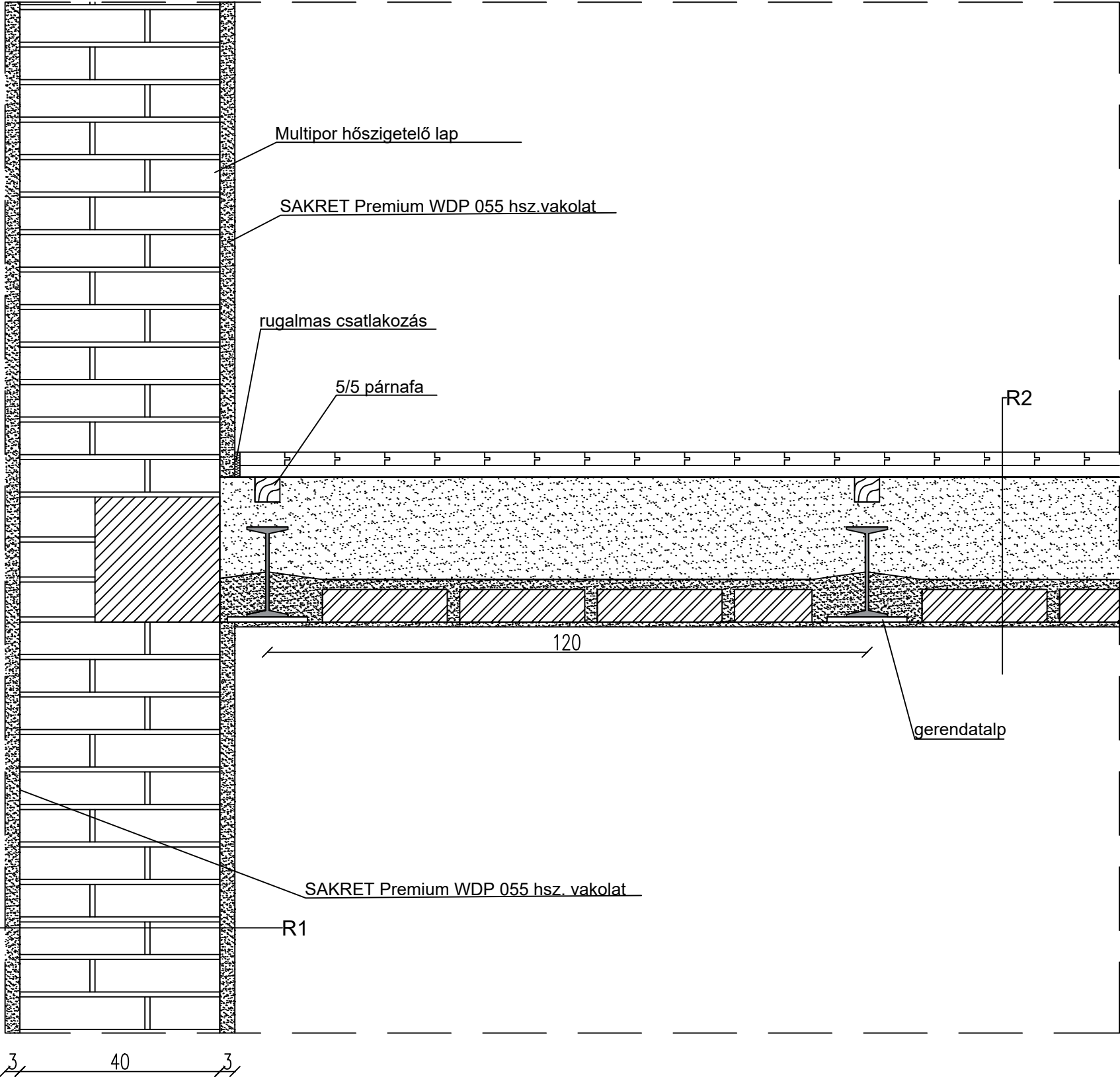
MSc Diplomamunka 2022/2023/1

CS02

E–ger. földém felújított rétegre

M= 1:10

Horcsik-födém felújítási opció: 3-3 cm hőszigetelő vakolat külső és belső oldalon



R1 külső fal rétegrend

3 cm SAKRET Premium WDP 055 hsz. vakolat
40 cm meglévő téglafalazat
3 cm SAKRET Premium WDP 055 hsz.

R2 födém rétegrend

1 cm belső vakolat
18 cm 1 km. vasgerenda, közte 6,5 cm magas kézi
falazótéglaából álló vb födémfalca 2 cm
habarcskitöltéssel
5/5 párnafa
2 cm vakpadló
3 cm csaphornyos parketta

Építőanyagok és Magasépítés TSZ.

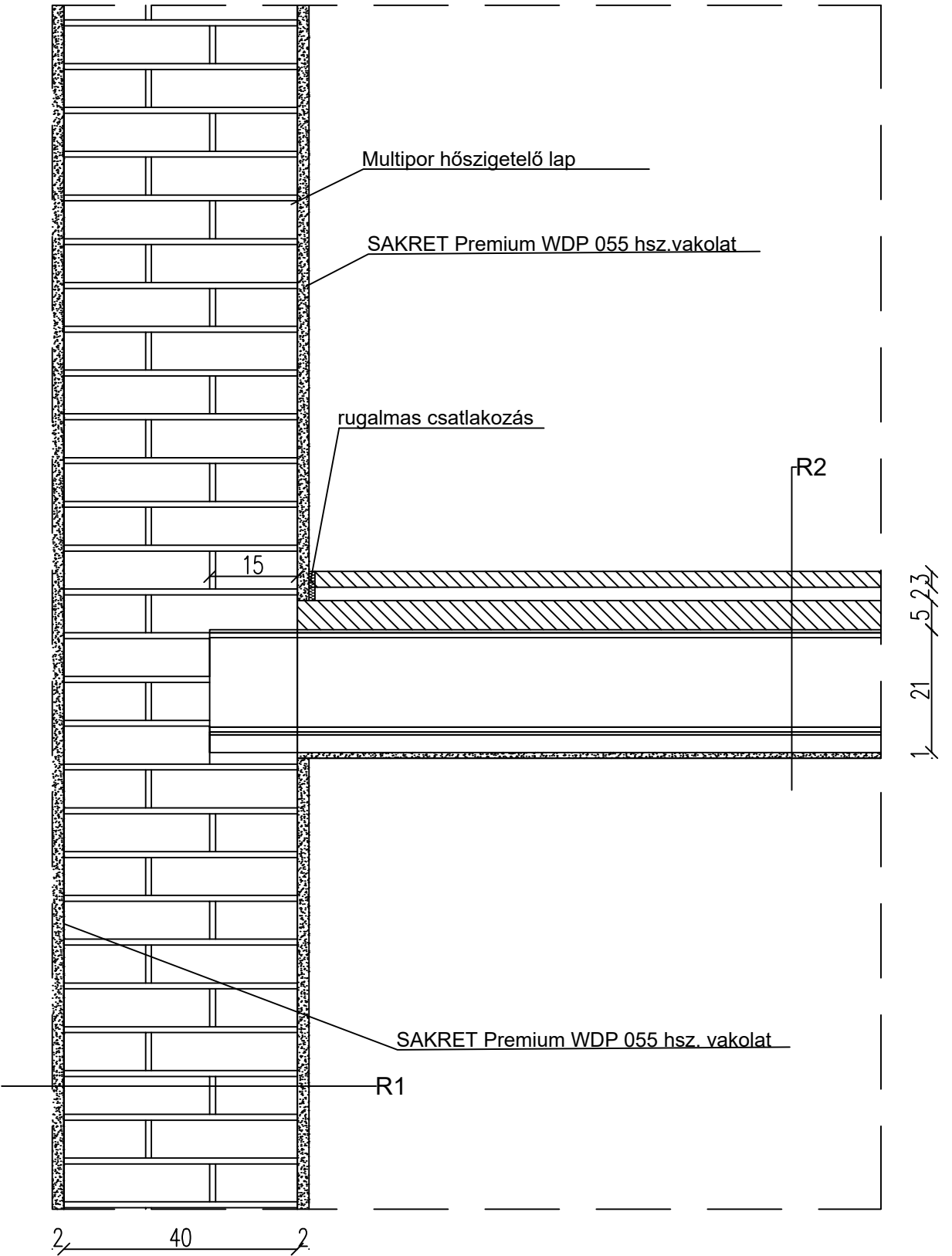
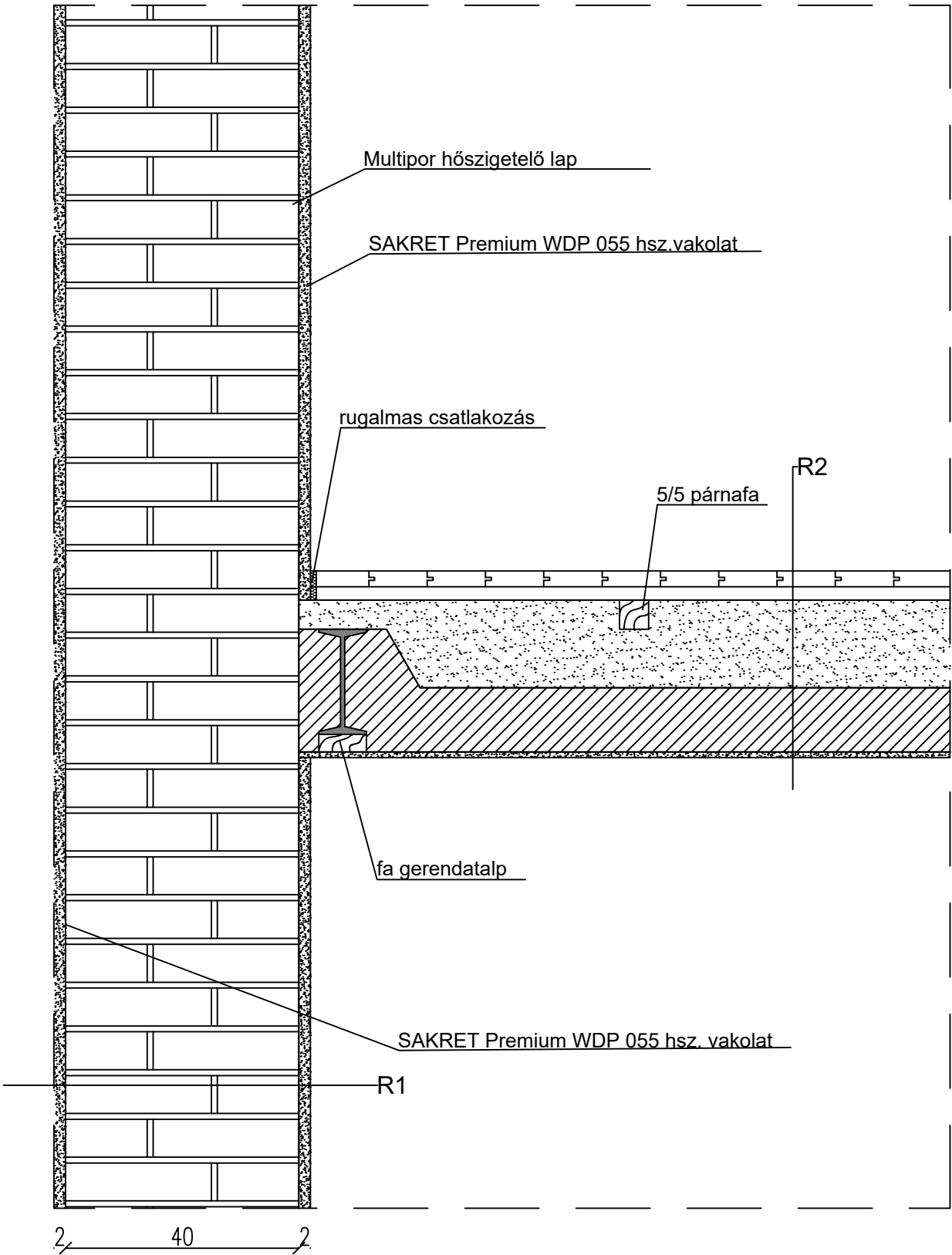
MSc Diplomamunka 2022/2023/I

CS03

Horcsik-födém felújított rétegrend

M= 1:10

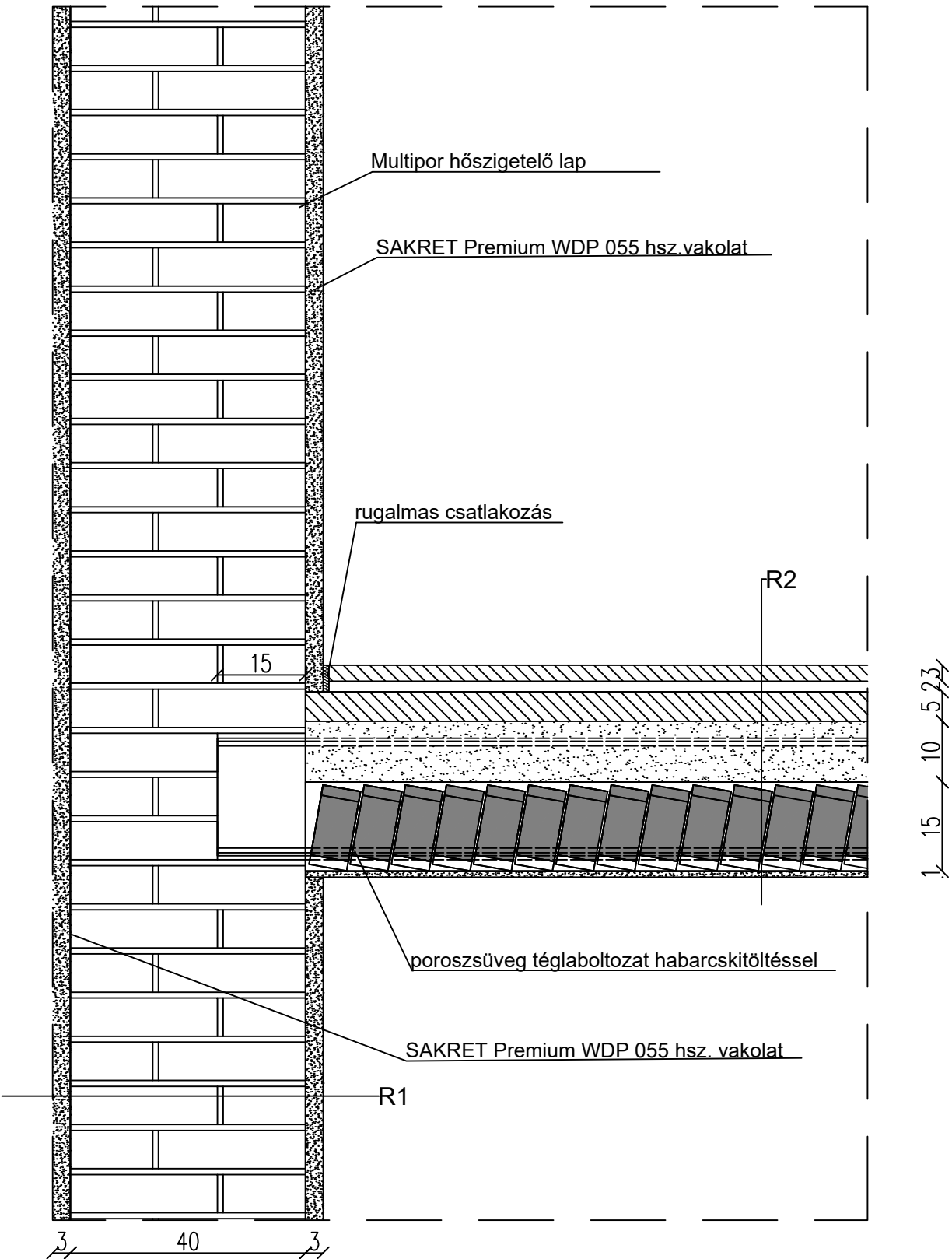
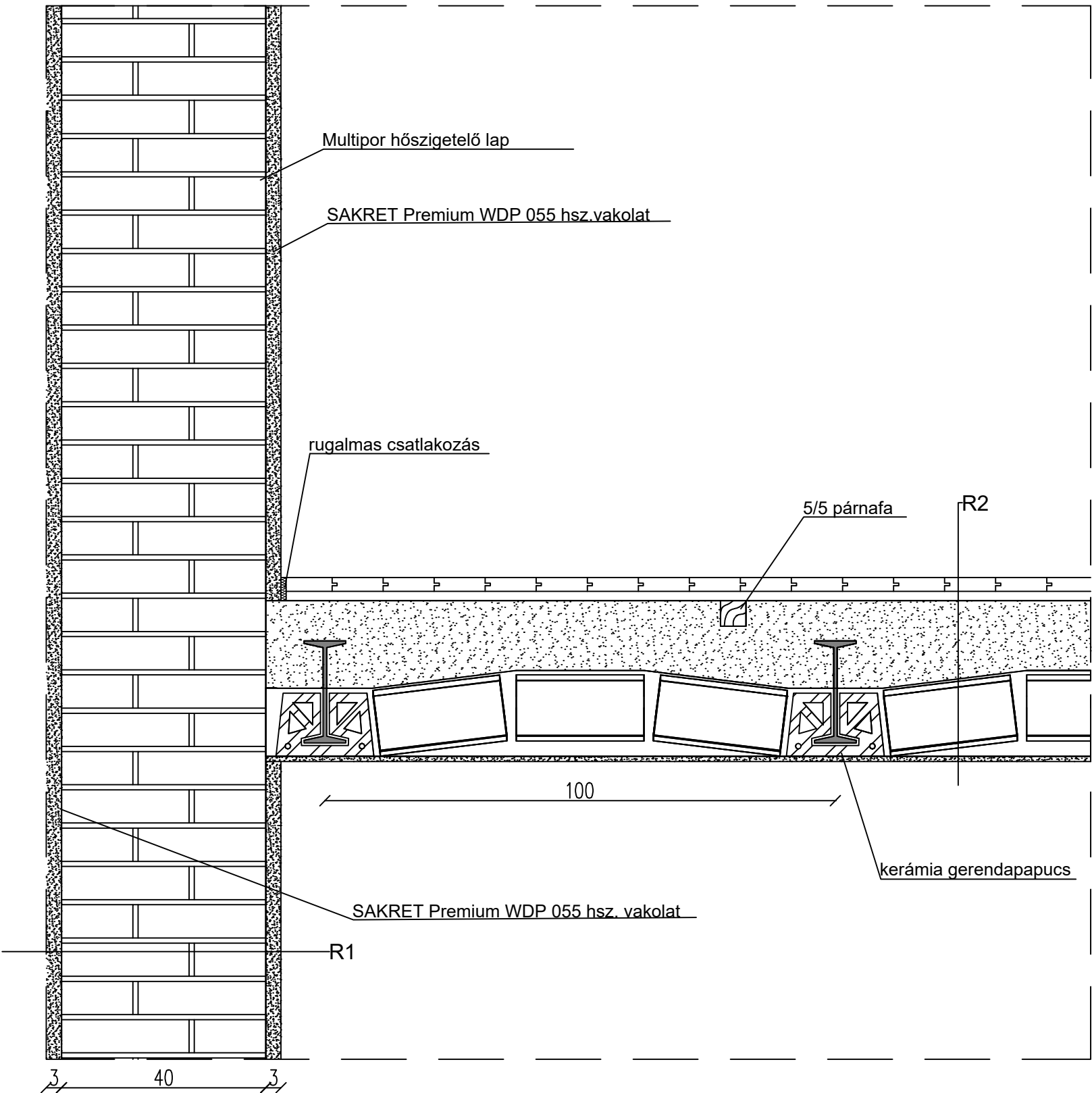
Monier-födém felújítási opció:2-2 cm hőszigetelő vakolat külső és belső oldalon



R1 külső fal rétegrend	R2 födém rétegrend
2 cm SAKRET Premium WDP 055 hsz. vakolat	1 cm belső vakolat
40 cm meglévő téglafalazat	18 cm l.km. vasgerenda közte 10 cm felülbordás betonlemez
2 cm SAKRET Premium WDP 055 hsz.	15 cm salakfeltöltés
	5/5 párnafa
	2 cm vakpadló
	3 cm csaphornyos parketta

Építőanyagok és Magasépítés TSZ.	
MSc Diplomamunka 2022/2023/I	CS04
Monier-födém felújított rétegrend	M= 1:10

Poroszsüveg földem felújítási opció: 3-3 cm hőszigetelő vakolat külső és belső oldalon



- R1 külső fal rétegrend

 - 2 cm SAKRET Premium WDP 055 hs. vakolat
 - 40 cm meglévő téglafalazat
 - 2 cm SAKRET Premium WDP 055 hs.
- R2 földem rétegrend

 - 1 cm belső vakolat
 - 20 cm l. km. kerámapapucsos vasgerenda között
 - poroszsüveg téglaboltozat habarcskitöltéssel
 - 10 cm salakfeltöltés
 - 5/5 párnafa
 - 2 cm vakpadló
 - 3 cm csaphornyos parketta

Építőanyagok és Magasépítés TSZ.	
MSc Diplomamunka 2022/2023/I	CS05
Poroszsüveg földem felújított rétegrend	M= 1:10