

# Óbudai Egyetem

## Biztonságtudományi Doktori Iskola

Doktori (PhD) értekezés



**Zöldtetők vizsgálata energia megtakarítás, valamint a környezeti terhelés csökkentése érdekében**

Szlivka F. Dániel

Témavezetők:

Dr. Horváth Sándor

Dr. Zachár András

Budapest, 2016

### Szigorlati bizottság

**Elnök:** Prof. Dr. Rajnai Zoltán, egyetemi tanár, ÓE

**Tagok:** Prof. Dr. Kovács Tibor, egyetemi docens, ÓE

Dr. Ruda Győző, c. egyetemi docens, külső, SZIE

### Nyilvános védés bizottsága

**Elnök:** Prof. Dr. Rajnai Zoltán, egyetemi tanár, ÓE

**Titkár:** Bakosné Dr. Diószegi Mónika, tanársegéd, ÓE

**Tagok:** Dr. Török Sándor, egyetemi docens, külső, SZIE

Dr. Ruda Győző, c. egyetemi docens, külső, SZIE

Prof. Dr. Pokorádi László, egyetemi tanár, ÓE

**Bírálok:** Dr. Molnár Ildikó, egyetemi docens, ÓE

Dr. Kajtár László, egyetemi docens, külső, BME

### Nyilvános védés időpontja

---

## Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt köszönettel tartozom a családomnak, hogy a munkám során támogattak, ösztönöztek. Külön köszönet illeti édesapámat, aki a személyes támogatáson túl szakmai kérdésekben is segítségemre volt.

A „zöldtetős” témában elindított és a TDK dolgozatom megírásában mentorom volt Horváth Sándor tanár úr. Sokat köszönhetek Dr. Ruda Győző és Prekuta János tanár uraknak, akik elkötelezett szakemberként mélyítették el a tudásomat a témakörben.

Köszönöm a témavezetőimnek Dr. Horváth Sándornak és Dr. Zachár Andrásnak a szakmai támogatást, valamint Dr. Rajnai Zoltán professzor úrnak, aki lehetővé tette számomra, hogy az Óbudai Egyetemen fejezzem be a megkezdett doktori tanulmányaimat.

# Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	7
1.1. Tudományos előzmények.....	7
1.1.1 A téma története, aktualitása, jelentősége.....	7
1.2. A kutatás irodalmi háttere, megalapozása.....	7
1.3. Célkitűzések.....	8
1.3.1. A kutatás tárgya.....	8
1.3.2. Célok.....	9
1.4. Eredmények feldolgozása.....	9
1.5. Várható eredmények.....	10
2. Szakirodalmi összefoglaló zöldtetők alkalmazására, épített környezetben.....	11
2.1. A városiasodás következtében felmerülő környezeti problémák.....	11
2.2. Zöldtetők fajtái.....	13
Intenzív zöldtető.....	13
Extenzív zöldtető.....	14
2.3. Zöldtetők általános szerkezeti felépítése.....	15
2.3.1. Általános szerkezeti felépítés.....	15
2.3.2. Rétegrendek.....	16
2.4. Zöldtető rétegei.....	16
2.4.1. Ültetőközeg.....	17
2.4.2. Szivárgó-, vagy vízmegtartó réteg.....	17
2.4.3. Szűrőréteg.....	21
2.4.4. Elválasztó réteg.....	21
2.4.5. Csúsztató réteg.....	21
2.4.6. Gyökéráthatolás elleni védőréteg.....	21
3. Talaj fizikai tulajdonságainak jellemzői és azok mérése.....	22
3.1. A talaj szemcseösszetétele.....	22
3.1.1. A szemcseösszetétel meghatározásának elve.....	23
3.1.2. A talaj pórustere.....	25
3.2. A talajok vízgazdálkodása.....	25
3.2.1. A talaj vízkapacitása.....	26
3.2.2. Nedvességformák.....	26
3.2.3. Nedvességpotenciál.....	27
3.3. Zöldtetők működése és annak motorja a vízháztartás.....	28
3.3.1. Bevezetés.....	28
3.3.2. Vízvisszatartás.....	28
3.3.3. Megfelelő pórustérfogat.....	30
3.3.4. Vízelvezetés.....	31
3.3.5. Párolgás.....	31
3.3.6. Öntözés.....	31
3.3.7. Vízmozgás a talajban.....	35
3.3.8. A talaj száradása.....	36
3.4. A talaj hőgazdálkodása.....	36
3.4.1. A talaj hőtani jellemzői.....	36
3.4.2. Hőáramlás a talajban.....	38
3.4.3. Hőháztartás és vizsgálata a szakirodalomban.....	38
3.5. A talaj hőtechnikai jellemzőinek vizsgálata.....	45

3.5.1. Hővezetési tényező számítása, mérése .....	46
3.5.2. A mérési módszerek .....	49
3.5.3. A számítási módszerek .....	50
4. A zöld tető mérési rendszere és mérési eredményi .....	53
4.1. A vizsgált épület tetőszerkezete .....	53
4.2. A hőmérsékletmérő berendezés.....	55
4.2.1. A hőmérséklet érzékelő szonda leírása és várható pontossága .....	57
4.3. A pillanatnyi hőmérsékletmérési eredmények .....	58
4.3.1. Az érzékelők elhelyezése: .....	58
4.3.2. A mért eredmények értékelése .....	59
4.3.3. A hőmérséklet mérési eredmények vizsgálata frekvencia tartományban .....	64
4.4. Az átlagolt hőmérséklet mérési eredmények értékelése.....	70
4.4.1. A betontető és a zöldtető nyári napi hőmérséklet átlagainak alakulása az egyes réteghatárokon.....	71
4.4.2. A betontető és a zöldtető téli napi hőmérséklet átlagainak alakulása az egyes réteghatárokon.....	72
4.5. Hővezetési tényező közelítő számítása a méréseim eredményeiből .....	74
4.5.1. A Hővezetési tényező meghatározása a téli hőmérséklet eloszlásokból.....	74
4.6. Talajnedvesség mérése .....	76
4.6.1. A gravimetrikus talajnedvesség meghatározás.....	76
4.6.2. Téli nedves (telített) talaj nedvességének mérése .....	76
5. A tetőszerkezet hőtechnikai számítása .....	79
5.1. A hőtechnikai számítás matematikai modellje .....	79
5.1.1. A megoldás feltételei.....	80
5.2. A zöldtető téli stacioner hőtechnikai számítása .....	81
5.2.1. Csak hővezetéssel terjedő hő számítása .....	81
5.2.2. Hőátbocsátás számítása .....	83
5.2.3. A számítás hőellenállásokkal .....	87
5.2.4. Néhány megjegyzés a hőellenállással kapcsolatban .....	88
5.2.5. A talaj nedvességének hatása a hőellenállásra .....	89
5.3. A betontető és a zöldtető nyári „stacioner” hőtechnikai számítása.....	89
6. A tranziens hőáramlás számítása.....	93
6.1. Egy analitikus megoldás.....	93
6.2. Tranziens megoldás véges differencia módszerrel.....	98
6.3. Tranziens megoldás numerikus szoftverrel, elméleti háttér .....	101
6.3.1. A födém geometriájának megadása .....	102
6.3.2. A födém véges térfogat hálójának generálása.....	102
6.3.3. A peremfeltételek .....	103
6.4. A födém tranziens megoldásának esetei .....	103
6.4.1. Tranziens számítás, a stacioner állapotban használt anyagjellemzőkkel nyári zöldtető és betontető esetén.....	104
6.4.2. Tranziens számítás a korrigált talaj hővezetéssel és kezdeti feltétellel nyári zöldtető és betontető esetén.....	106
6.4.3. Tranziens számítás a téli zöldtető és betontető esetén .....	107
7. Zöld tetők bekerülési költségei, megtérülés, környezeti előnyök .....	109
8. Összegzett következtetések .....	112
8.1. Új tudományos eredmények .....	115
1. Tézis: .....	115
2. Tézis .....	115
3. Tézis .....	115

4. Tézis .....	115
5. Tézis .....	116
8.2. Az eredmények hasznosítási lehetősége .....	116
Irodalomjegyzék.....	117
Publikációs lista.....	121
Folyóirat cikkek .....	121
Konferencia kiadványok.....	121
Függelék 1. – Fogalom meghatározás .....	122
1.1. Fogalom meghatározás.....	122
1.1.1. Lefolyási együtttható .....	122
1.2. Maximális lefolyási tényező.....	122
1.3. Átlagos lefolyási tényező .....	123
1.4. Éves lefolyási tényező .....	123
1.5. Összlefolyási tényező .....	124
1.6. Véglefolyási tényező .....	124
1.7. Maximális vízkapacitás .....	124
1.8. Vízáteresztő képesség ( $K_f$ modulus): .....	124
1.9. Vízmegtartó képesség és éves lefolyási tényező.....	125
1.10. A vízmegtartó képesség mértéke.....	125
1.11. Evaporáció.....	125
1.12. Transzspiráció .....	125
1.13. Evapotranszspiráció .....	125
1.14. Intercepció .....	125
1.15. Hervadáspon.....	126
1.16. Ombrometer .....	126
Függelék 2. - Kísérleti eredmények .....	127
2.1. Csapadék-visszatartás.....	127
2.1.1. Vízmegtartás jelentősége.....	127
2.2. Mérési tényezők ingadozása.....	128
2.3. Mérési tényező, kísérleti eredmények és normatív előírások .....	128
2.3.1. Peremfeltételek ingadozásai .....	129
2.3.2. Kísérleti eredmények ingadozásai.....	129
2.3.3. Kísérleti eredmények.....	130
Függelék 3. Extenzív zöldtetők lefolyás-késleltetése.....	134
3.1. Kutatások ismertetése.....	134
3.2. Módszerek .....	135
3.3. Eredmények.....	135
3.3.1. Nagy intenzitású eső nedves megelőző körülmények között nyáron.....	136
3.3.2. Nagy intenzitású eső száraz körülmények között, 2005 tavasz.....	136
3.3.3. 2004/2005 tele egyetlen nagy intenzitású csapadékhullással.....	136
3.3.4. A csapadékvíz-kezelés eredményei városokban zöldtetők használata mellett....	136
3.4. Összegző számítás.....	137

# 1. Bevezetés

## 1.1. Tudományos előzmények

### 1.1.1 A téma története, aktualitása, jelentősége

Az antik világból ismert tetőkertek után a reneszánsz korában jelentek meg Európában a teraszok és függőkertek, amik nem csak reprezentatív, hanem funkcionális igényeket is kielégítettek.

Olyan műszaki, építészeti megoldások születtek, amelyek lehetővé tették azt, hogy ne csak edényes növények jelenhessenek meg, hanem a tetőkert szintjén kialakított földágyakba ültessék a vegetációt.

A divat Itáliából kiindulva terjedt szét Európában, egészen az északi udvarokig, ahol mindenekelőtt a skandináv és izlandi történeti példák a legismertebbek. A füvesített zöldtetőket ebben a hideg éghajlati övben hőszigetelő hatásuk miatt alkalmazták.

150 évvel ezelőtt születtek meg az ún. facementtetők, amelyek közül még ma is sok fellelhető Berlinben. Tűzvédelmi okokból a kátránypapírral szigetelt tetőket kavics-agyagréteggel láttak el, amit vetőmagokkal szórtak tele, biztosítva az éveken át tartó vegetációs fejlődést.

Az építészetben Le Corbusier illetve Walter Gropius és a Bauhaus mozgalom más képviselői tették igazán ismerté és népszerűvé a zöldtetőket. „A tetőkertek a ház használati részét képezik, illetve visszaadják a természetnek az elvesztett területet” - írja Le Corbusier 1923-ban.

A 70-es években túlnyomórészt mélygarázsok, aluljárók és előépületek tetejét hasznosították zöldtetőkként. A további fejlődés előfeltétele volt, hogy a beépített anyagok költséghatékonyak legyenek és a technológia egyszerűsödjön. Ez a 80-as években teljesedett be, amikor már nem csak használati és gazdasági szempontból, hanem ökológiai szempontok végett is elkezdtek építeni extenzív zöldtetőket.

Az első szakmai szabályzat, ami lefektette a zöldtetők irányelveit az 1982-ben megjelent FLL [9]. Kutatástevékenység tájfejlesztés, tájépítés szabvány volt. 1984-ben követte a „Vizsgálati-folyamat gyökérállóság és gyökérálló lemezek területén”. 1990 óta az FLL az irányadó mind extenzív, mind pedig intenzív zöldtetők tervezésénél, kivitelezésénél és karbantartásánál.

Napjainkban egyre inkább előtérbe kerül az energiatudatos építés, amelynek okozója az energia költségének növekedése. Ez mintegy elősegíti és gyorsítja az olyan építésmódok fejlődését, amelyek arra töreksznek, hogy a megvalósuló épület fenntartására, működtetésére fordított energia a lehető legkevesebb legyen. Ennek egyik eleme lehet a zöldtető létesítése a teljes épületen, vagy akár annak csak egy részén. A nemzetközi tetőzöldesítési gyakorlat, valamint a már ismert hazai zöldtetős kísérletek alapján megállapítható, hogy ma már reális lehetőség van az épületek által elfoglalt zöldterületek visszapótlására. A városokban nagy számban meglévő és épülő lapostetők ökológiailag aktív felületekké alakíthatóak át.

## 1.2. A kutatás irodalmi háttere, megalapozása

A zöldtetők témakörében a legjelentősebb kutatások Németországban folynak. Emellett már számos hazai példa is azt bizonyítja, hogy a zöldtető építés Magyarországon is a szakma érdeklődésének középpontjába került. Évente megrendezésre kerül a Zöldtetőépítők Országos Szövetségének konferenciája a Nemzetközi Zöldtető Konferencia mintájára. Itt összegzésre kerülnek az éppen aktuális kutatási eredmények és megfogalmazzák az új irányokat, amit a témában tevékenykedőknek követni érdemes. Az idei konferencia fő témája „A zöldtetők a

klímaváltozás ellen” címet viselte. Ebben is hangsúlyozták, hogy mennyire nagy szükség van a zöldtetőkkel kapcsolatos kutatásokra hazánkban is, hiszen az elmúlt években érezhető az időjárás egyre szélsőségesebbé válása, amelyre egy megfelelő válasz lehet a zöldtetők létesítése az eddiginél nagyobb számban.

Az ÉMSZ (Épületszigetelők, Tetőfedők és Bádogosok Magyarországi Szövetsége) kiadásában elérhető a Zöldtetők tervezési és kivitelezési irányelvei, ami hazánkban az első útmutatás zöldtetők építésére vonatkozóan. Emellett a fent említett német irányelv, az FLL magyar fordítása is elkészült [41], [8]. A kutatási eredmények nagy része német forrásokból érhető el, illetve a Nemzetközi Zöldtető Szövetség (International Green Roof Association) konferenciáinak köszönhetően.

A német kutatások közül a legújabbakat a neubrandenburgi egyetemen folytatják Manfred Köhler professzor vezetésével. Az 1999 óta folyó gazdasági kutatások az extenzív zöldtetők témakörében a már fent említett csapadékvíz-lefolyást vizsgálják [48]. Az éveken át összegyűjtött adatokat összegezve a 2005-ös konferencián ismertette a kutatócsoport a lefolyással és vízmegtartással kapcsolatos eredményeket [1], amelyek a vizsgálatokkal meghatározott ún. lefolyási tényező értékeit adták meg. Az eredmények tükrében kijelenthető, hogy a zöldtetők a hagyományos kavicsolt tetőkhöz képest jelentős előnyökkel bírnak, ami a csapadékvíz megtartását és elpárologtatását illeti. Ehhez kapcsolódóan szükséges azt is vizsgálni, hogy ez hogyan hat az adott épület hőháztartására és számszerűsíteni, hogy a zöldtető rétegfelépítésének függvényében, hogyan alakul ez a hatás. A neubrandenburgi egyetem kutatói ezzel kapcsolatban is végeznek kísérleteket [32]. Infravörös kamerával vizsgálják a zöldtető felületén lévő hőmérsékleteket különböző időpontokban, és ezek alapján vannak le következtetéseket a hőháztartásra vonatkozóan. Köhler a témában további cikksorozatot közölt a vizsgálatairól [23], [42], [5], [43] [44].

### **1.3. Célkitűzések**

#### **1.3.1. A kutatás tárgya**

A zöldtetőkkel kapcsolatos kutatásaim fő témája az, hogy milyen eszközökkel lehet elérni a zöldtetőktől elvárt optimális hatást. Egyrészt beszélhetünk a zöldtetőknek az épület energiaháztartására gyakorolt jótékony hatásáról. Ez azt jelenti, hogy mintegy hőszigetelő réteggént működhet a vegetáció felépítménye. Ez a korábban épült zöldtetőket még kevésbé jellemzi, hiszen, ugyan jó hőkapacitásúak illetve hőkésleltetők voltak, de ehhez nem párosult a jó hőszigetelő képesség [4]. Ezt a korszerű talajkeverékek és a különböző vízmegtartó rétegek biztosítják a mai zöldtetőknek. A témával foglalkozó szakirodalom igen bőséges ezen a téren [49], [52], [53], [56], [18].

A zöldtető télen csökkenti az épületszerkezetek hőveszteségét, ezáltal a belső tér lehülését, nyáron pedig ugyanezek felmelegedését enyhíti. Tulajdonképpen puffer zónaként funkcionál [86] Ennek nagyobb jelentősége nyáron van, hiszen a zöldtető vízmegtartó rétegében tárolt víz mennyisége növelni képes ezt a hőingadozásra gyakorolt pozitív befolyást azzal, hogy a napsugárzás hatására a talajréteg és a növények párologása hűti a tetőfelépítményt. A növényi légzés ugyanis hőelvonással jár, hűti a környezetét, jelentősen javít a mikroklímán. A japánok a tetőkertek ezen előnyös tulajdonságára alapozva, Tokióban 2010-ig 2000ha zöldtetőt építettek, így mérsékeltek az elviselhetetlenül forró nyári éjszakákat [35].

A zöldtetők további előnye, hogy hőszigetelés elnyelő képességük révén nagyban csökkentik a felfelé ható termikus hő-mozgást, amely a városközpontok felett kialakuló egyre gyakoribb heves zivatarok kiváltója.



Másrészt az energiaháztartáson túl a zöldtetők fontos tulajdonsága a csapadékvíz megtartása, és a lefolyás késleltetése. Már kis rétegfelépítés esetén is jelentős vízmennyiség tartható vissza. Ebből jelentős ökológiai előny származik, ami jó hatásfokkal kompenzálja a természetbe való beavatkozásunkat.

Hagyományosan burkolt felületeknél (tetők, utcák, terek...) az esőzés bekövetkezésével párhuzamosan elkezdődik a vízfolyás és közvetlenül annak befejezésekor megszűnik. Tehát a zöldtetők csökkentik a maximális lefolyási értéket, így karakterisztikus lefolyási értéke is különbözik a hagyományos tetőktől. Az az időkülönbség írja le a késleltetést, ami a lehullott vízmennyiség maximuma és az elvezetett vízmennyiség maximuma között van [33].

### **1.3.2. Célok**

Látjuk, hogy a zöldtetők azáltal, hogy többletréteget képeznek az épületen és emellett vizet képesek rétegfelépítésük révén magukban elraktározni, rendkívül pozitív hatással vannak az épület energiaháztartására. Éppen ezért fontosnak tartom, hogy részletesen megvizsgáljuk, hogy a különböző zöldtető kialakítások hogyan viselkednek a fenti tekintetben. A kutatómunka célja ennek tükrében, hogy összefoglaljuk az eddigi külföldi és hazai kutatásokat és feltárjuk azok eredményeit és hiányosságait, továbbá hogy olyan vizsgálatokat folytassunk, amelyek eredményeképpen olyan következtetéseket tudunk levonni, amelyek a további tervezések során hasznosíthatók lesznek.

A kutatás témáját képező zöldtetők viselkedését a kutatás során lakó- valamint egyéb rendeltetésű épületek tekintetében vizsgáltam meg. Részletesen vizsgáltam a zöldtetők hőháztartását. Az egyes rétegekben kialakuló hőmérséklet eloszlásokat. Mérésekkel és számításokkal követtem egy adott zöldtető esetében a tetőszerkezet viselkedését. Mind stationer, mind tranziens hőtani folyamatokat vizsgáltam. Majd egy éven keresztül nyomon követtem egy általam kialakított mérőrendszer segítségével a tetőszerkezet egyes rétegeiben lezajló hőtani folyamatokat. Az adott épület esetében módomban volt összehasonlítani a zöldtető és a hagyományosnak számító betontető hőtani viselkedését. Az épület ugyanis korábbi hasonló vizsgálatok céljából úgy lett felújítva, hogy egy része hagyományos betontetős szerkezet, másik része pedig extenzív zöldtetővel rendelkező födémmel bír.

Az extenzív zöldtetők nagy előnye, hogy ha gondosan választjuk ki a talajkeveréket és a növényzetet, akkor alig igényel gondozást, ezért kiválóan alkalmazhatók az épületekhez.

### **1.4. Eredmények feldolgozása**

Szükség van a rendelkezésre álló eredmények összegyűjtésére és feldolgozására. Meg kell vizsgálni, hogy ezeket milyen formában lehet itt Magyarországon hasznosítani, és milyen kiegészítések szükségesek, amelyeket a kutatásunk keretein belül el tudunk végezni.

A kutatás vezérvonala a következő: azt vizsgáltam, hogy azáltal, hogy egy épületen zöldtető létesül, mennyi energia takarítható meg, illetve ez hogyan alakul az év különböző időszakában.

A célt egyrészt megvalósult épületek esetében tudjuk vizsgálni mérések segítségével, másrészt pedig különböző modell kísérletekkel. A fizikai, matematikai és numerikus modell validálását a korábban egy középületen közel egy éven keresztül végzett mérésekkel hajtottam végre. Itt lehetőségem nyílt arra, hogy különféle időjárási viszonyok között zöldtetővel ellátott épület termikus viselkedését elemezni tudjak. Lehetőségem volt a modellel összehasonlítani a zöldtető és a hagyományos lapos tető hőtani viselkedését. A modell az épület strukturális felépítését nagy pontossággal követi, például a födém rétegrendjét a legapróbb részletekig figyelembe veszi. Az épületek szokásos hőtechnikai számításainak részletességén messze túlmutat az itt alkalmazott megközelítési eljárás. A számítási modell

más területen is előrelépést jelent a hagyományosnak számító hőveszteség vagy hőnyereség számításokhoz képest. A hagyományos számítások általában stacioner hőmérséklet mezőt feltételeznek [1]. A szerkezeti elemek hőtehetetlenségét kevéssé veszik figyelembe. A kifejlesztett számítógépes szimulációban tranziens hőveszteség és hőnyereség számítást is tudtam modellezni.

A kutatás során a következő lépések elvégzését tűztem ki további kidolgozandó célokként:

- Zöldtető rétegrend (vegetáció és szubsztrát) lefolyásvizsgálata irodalmi adatok alapján
- Adott zöldtető energiaháztartás vizsgálata
- Mérési módszerek kidolgozása annak bemutatása, saját és mások mérési eredményeinek felhasználása
- Szimulációs módszerek alkalmazása főként saját mérések felhasználásával.

Ezektől azt várjuk, hogy a kísérletek és kutatások eredményeként olyan számszerű értékeket kapunk, amelyek alkalmazhatóak lesznek a továbbiakban a zöldtető tervezési gyakorlatban is.

## **1.5. Várható eredmények**

A kutatásoktól olyan eredményeket várok, amelyek segítik a hazai zöldtető tervezés fejlődését, és a városi környezetben megvalósuló szerkezetek vizsgálati módszereit és adatait felhasználva, egyéb épületei számára is többletet nyújtanak. A cél az, hogy megmutassam, hogy gazdaságos a zöldtető készítése ezekre az épületekre, akár jobban is működhet, mint egy hagyományos fedés. Továbbá a számítógépes modell és kísérletek segítségével gazdaságossági számítást (megtérülést) is megpróbálok felállítani. Dolgozatomban részletesen foglalkozom a zöldtetők vízelvezetési és víztározási problémáival is. Ez a problémakör nem csak egy adott épület, hanem egy település vízelvezetési, csatornázási problémáit is nagymértékben befolyásolja. Ennek megfelelően komplex településre vetített anyagi haszna is van a csatornarendszer kiépítésében, ha a több épület rendelkezik zöldtetővel. A megfelelő nagyságú zöldtető felület azáltal, hogy növeli a zöldterület arányát, befolyásolja a mikroklímát is. Ez egyrészt a hőmérsékletekben, másrészt a levegő tisztaságában is jelentkezik. A nagyobb zöldfelület csökkenti főként nyáron a hőmérsékleti csúcsokat, kiszári a levegőben lebegő porszemcsék egy részét, valamint bizonyos vegyi anyagok koncentrációját is csökkenti.

## **2. Szakirodalmi összefoglaló zöldtetők alkalmazására, épített környezetben.**

Az ember által épített lakókörnyezetbe telepített növényzet alkalmazását a lakókörnyezet élhetőségének javítására már évezredek óta alkalmazzák, az erre való törekvéseket már az ókori építészetben is megfigyelhetjük. A huszadik század második felétől viszont megkezdődött a tudományos alapokon nyugvó vizsgálata a különféle növényi takaróval ellátott épületeknek, elsősorban azok energetikai viszonyainak vizsgálatát és feltárását tartva szem előtt. Ezeknek a vizsgálatoknak napjainkban azért is van kiemelt jelentősége, mivel az elmúlt évtizedek emberi populáció eloszlásának trendjei az egyre fokozódó városiasodás irányába mutatnak és az egész bolygón élő emberek egyre nagyobb hányada fog városokban élni illetve a városokba költözni. A fokozódó urbanizáció számos a lakókörnyezet élhetőségével kapcsolatos megoldandó problémát vet fel, amelyekre az elkövetkező évtizedekben hatékony válaszokat kell adnunk [21]. Ezeknek a problémáknak a kezelésére az egyik hatékony megoldási lehetőség a különféle növényi takaró fokozott alkalmazása az épített lakókörnyezetben [4].

Különféle épületek tetejére, esetleg környékére, közelébe telepített növényzet költséghatékony, energetikai szempontból is fenntartható lehetőséget biztosít az egyre fokozódó urbanizációval kapcsolatban felmerülő környezeti problémák megoldására, illetve azok enyhítésére [39]. A zöld tetők tervezésének és kivitelezésének szempontjait Hidy, Prekuta, és Varga foglalták először össze magyar kiadású könyvükben [20].

### **2.1. A városiasodás következtében felmerülő környezeti problémák**

A fokozódó urbanizáció hatására felmerülő legfontosabb környezeti problémák, amelyekre az épületekre telepített növénytakaró alkalmazása megoldást kínálhat a következők:

- Drasztikusan romló levegő minőség különféle szennyező anyagoknak a levegőbe juttatásával, továbbá a közlekedés miatt felemelkedő por által.
- A sűrűn beépített területek növekvő átlagos környezeti hőmérséklete, amit hőszigeteknek is nevez a szakirodalom.
- A nagymennyiségben lezúduló csapadékvíz elvezetésének problematikája, ami a csatornahálózat és a szennyvízkezelés fokozódó nehézségeit vetíti előre.

Ezekre a problémákra kínál hatékony megoldást a növényi takaróval ellátott épületek széleskörű alkalmazása.

Zöldtetők alkalmazásával csökkenthető a nagymennyiségben lezúduló csapadékvíz jelentette probléma, ugyanis a lehulló csapadékvíz időlegesen akár a helyi csatornahálózatokat is túlterhelheti. A lehulló csapadékvíznek a csatornahálózat terhelésére gyakorolt hatását a növényi takaró azáltal csökkenti, hogy az épületeken elhelyezett növényi takaró mindig valamilyen ültető közegben (termőtalaj) kerül elhelyezésre, amelyek porózus voltak miatt időlegesen nagymennyiségű víz megkötésére alkalmasak, illetve a víz elfolyását lassítja. A témában Kolb és König közöltek cikkeket és előadásokat [26],[47], [46], [48].

Továbbá maga a növényzet a megkötött víz egy jelentős részét felhasználja az életfunkcióinak fenntartására így a lehulló csapadéktömeg nem a csatornahálózatba kerül, hanem párologtatás útján kerül vissza a levegőbe a növényzet által. Ennek a párologtatási folyamatnak pedig van egy ennél is fontosabb és számunkra hasznos hatása a lakókörnyezetre, mégpedig a párologással együtt járó hűlési folyamat [62], [63].

A növényi takaró alkalmazása elsősorban a lakókörnyezet, illetve az épületek túlmelegedésének (nyári időjárási körülmények) megakadályozásában játszik jelentősebb szerepet, ez a tény az alábbiakban az irodalomban található mérési eredményekből is világosan látszódik majd. Természetesen a növényzetet megtámasztó ültetőközeg vastagságának (mélységének) függvényében termikus szigetelő közegként is funkcionál, ami téli időjárási körülmények között az épület hővisszatartását elősegíti, de maga az ültetőközeg nem tekinthető hatékony szigetelőanyagának, főként ha annak nedvességtartalma magas, közel van annak telítettségi állapotához. Nyári időjárási körülmények között viszont a zöldtetők alkalmazásával tovább javítható, illetve beállítható az épületek környékén, illetve az épületek belsejében a lakók által igényelt hőmérséklet értéke, csökkenthetőek a nagyvárosi épületek környezetében kialakuló úgynevezett hőszigetek hőmérsékletének értéke, valamint az épületek klimatizálására felhasznált energia mennyisége is jelentősen csökkenthető zöldtetők alkalmazásával. Ezt a hatást a növényi takaró alapvetően két jelenségen keresztül biztosítja számunkra [67], [78] [75] továbbá, madridi zöldtetők energetikai tapasztalatairól számol be Saiz-Alcazar, S. and B. Bass [64] cikkében.

- Az előzőekben már említésre került, hogy a növény természetes életfunkcióival együtt járó párologtatási folyamat idézi elő a nagymértékű környezeti hűtési hatást. Ez a jelenség a növények természetes élettani folyamataival magyarázhatóak, amelyek nagysága jelentős mértékben függ attól, hogy milyen típusú növényzetet telepítünk az épületre, továbbá a növényi takaró területi eloszlásától és lokális sűrűségétől is nagymértékben függ a párologtatási folyamat intenzitása.
- A másik szintén igen fontos hatása a növényi takarónak a direkt beeső napsugárzásra gyakorolt árnyékoló hatás, amely egyfajta kvázi „napernyőként” viselkedik az épületszerkezetre eső napsugárzás szempontjából [8], [20]. A növényi borítottság mértékére a szakirodalom egy fogalmat vezet be, amit LAI-nak Leaf Area Index-nek nevez, ezt magyarul növényborítottsági tényezőnek (faktornak) is nevezhetjük. A növényborítottsági tényező dimenziómentes szám, ami a növényi levélzet felületének vetületét jelenti az egységnyi talajfelületre, ami felett a növényzet elhelyezkedik [7]. Például, ha a tető felületének tetszőlegesen választott egységnyi területi része átlagosan két levél alatt helyezkedik el, akkor a LAI értéke kettő. A LAI numerikus értéke nullától kezdődően tetszőlegesen valós (azaz nem egész) szám lehet és értéke meghaladhatja az egy egészet is, mivel a növényi levélzet akár több rétegben is fedheti ugyanazt a talajfelületi részt. A LAI numerikus értéke a zöldtetők többségénél a 0.5 és 5 között helyezkedik el.

A levegő minőség javításában pedig olyan módon játszik jelentős szerepet az épületekre telepített növényi takaró, hogy egyrészt a felvert por egy részét megkötöti [17]. Továbbá a növény életfunkcióinál fogva a fotoszintézis révén széndioxid fogyasztó és, ezáltal nem csak megkötöti a különféle eszközök által kibocsátott széndioxidot, hanem ezen folyamat következtében oxigént is előállít, amivel jelentősen javítja az erősen beépített területek levegő minőségét, növelve a levegő oxigén tartalmát az épületek környezetében (ld. **2.1. ábra**).



**2.1. ábra** Egy város zöld környezete zöldtetővel és parkkal

Néhány európai nagyváros zöldterület aránya egy lakosra vetítve

Athén: 2.5 m<sup>2</sup>/lakos

Budapest: 14.4 m<sup>2</sup>/lakos

London: 27 m<sup>2</sup>/lakos

Helsinki: 122 m<sup>2</sup>/lakos

Bécs: 124 m<sup>2</sup>/lakos

A felsorolt városok közül Budapest helyzete a majdnem a legrosszabb helyen áll, így ennek hazai aktualitása is jelentős.

## **2.2. Zöldtetők fajtái**

Az épített környezetben alkalmazott zöldtető megoldásoknak alapvetően két típusa ismeretes, amelyeket napjainkban széles körben alkalmaznak, ezek a következők:

- Intenzív zöldtető
- Extenzív zöldtető (ld. 2.2. ábra)

### **Intenzív zöldtető**

Intenzív zöldtető esetén a termőréteg vastagsága legalább 20 cm vagy ennél az értéknél is nagyobb. Az ebbe a kategóriába tartozó zöldtetők nagyobb bokros vagy akár nagyobb fákat is magában foglaló növényzetet is tartalmaznak. Előnye a nagy zöldfelület, amelynek hatásaként

a zöldtetőkkel kapcsolatos hasznos tulajdonságok fokozottabban jelentkeznek, hátrányaként fogható fel a nagyobb telepítési és fenntartási költségek, valamint a nehezebb, esetenként bonyolultabb tetőszerkezet, ami hagyományos nem zöldtetők kialakítására tervezett épületek esetén jelenthet problémákat a kivitelezés során.

## Extenzív zöldtető

Extenzív zöldtető esetén a termőréteg vastagsága megközelítőleg 5-10 cm vagy ettől valamivel vastagabb is lehet, de nem jellemző [21]. Ebben a kategóriában a zöldtető vegetációjának típusa elsősorban különféle füvekből és virágokból, esetleg kisebb kiterjedésű bokrokból és cserjékből áll. Az extenzív zöldtető előnye az alacsonyabb kivitelezési és fenntartási költség valamint a tető egyszerűbb szerkezeti felépítése, ebből következően a szélesebb alkalmazási terület lehetősége is említést érdemel, ami alatt az érthető, hogy elvben szinten minden hagyományos épület tetejére, ha az megfelelő kialakítású (nem túl meredek a tetősík), akkor extenzív zöldtető telepíthető. A zöldtetők többsége jelenleg az extenzív kategóriába tartozik, mivel egy átlagos családi ház esetén jelenleg ez képzelhető el relatíve költséghatékony kivitelezéssel megvalósíthatónak.

Általánosságban kijelenthető hogy napjainkban elsősorban nagyobb épületek (középületek, nagy beépítettségű sűrűségű belvárosi épületek) esetén jellemző a zöldtetők kialakításának fontolóra vétele a tervezés illetve a kivitelezés során, mivel itt áll rendelkezésre, azaz esetleges építészeti és épületszerkezeti tartalék (statikai, férőhely, szaktudás, stb.) ahol egyáltalán fontolóra vehető egy esetleges növényi takaró kialakítása az épület tetején [23],[24], [22].



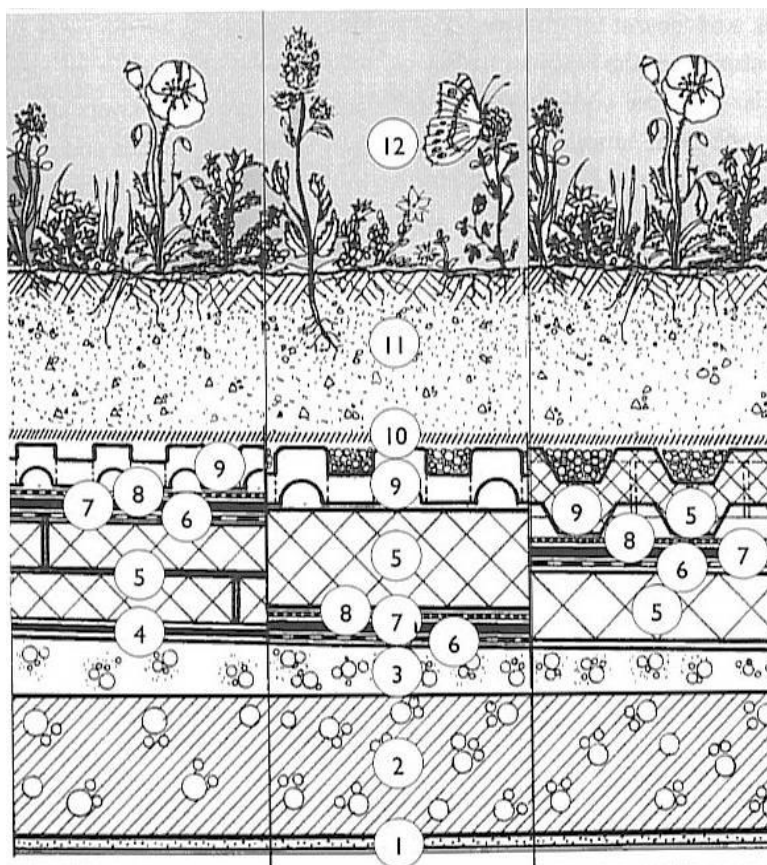
2.2. ábra Extenzív és intenzív zöldtető

## 2.3. Zöldtetők általános szerkezeti felépítése

### 2.3.1. Általános szerkezeti felépítés

A zöldtető rétegei több sajátos funkciónak kell, hogy eleget tegyenek, úgy, mint a csapadékvíz szigetelés védelme (például gyökér átfürödés ellen), a növényzet táplálása, azaz a nedvesség utánpótlás biztosítása, vagy a megfelelő leterhelés biztosítása. A 2.3. ábrán látunk egy rétegrendről készült vázlatot.

A legfelső, vizuálisan megjelenő réteg maga az ültetőközeg a növényzettel. Az eltérő anyagú rétegek között minden esetben megjelenik valamiféle elválasztó réteg az esetleges kémiai összeférhetetlenség megelőzésére, amelyek semleges tulajdonságú anyagok. A talaj finom szemcséinek kiszóródását, kimosódását szűrőréteggel akadályozzuk meg. A vízháztartás szempontjából az egyik legfontosabb réteg a zöldtető felépítményében az ún. szivárgó- vagy drénréteg.



2.3. ábra Zöldtető rétegeinek komplex szerkezete használatos hőszigetelés pedig fölé kerül [82].

Megnevezések:

1 Felületkiegyenlítő és felületképző rtg. 2 Teherhordó szerkezet 3 Lejtést adó rtg. 4 Párazáró rtg. 5 Hőszigetelő rtg. 6 Elválasztó-védő rtg. 7 Csapadékvíz-szigetelés 8 Gyökérzet ellen védő rtg. 9 Vízterelő-vízvezető rtg. 10 Szűrő-védő rtg. 11 Termőtalaj, termőföld 12 Vegetáció

Feladata a fölösleges vízmennyiség gyors elvezetése és a növényzet számára szükséges

vízmenyiség visszatartása. Egyes szivárgórétegek részt vesznek a szűrés feladatában is, azaz korlátozzák a tápanyagok kimosódását, megakadályozván a lefolyók eldugulását. Ezen felül a zöldtető felépítmény páradiffúziós szellőztetését is biztosítani képesek.

A modern zöldtetők általában számos szerkezeti réteget tartalmaznak, amelyek mindegyikének megvan a maga funkcionális rendeltetése. A rétegrendben alulról felfelé haladva ezek a rétegek a következők.

### 2.3.2. Rétegrendek

A csapadékvíz elleni és a hőszigetelés elhelyezkedésének függvényében három különböző rétegfelépítést különböztetünk meg:

Egyenes rétegrendű tető: a vízszigetelés a hőszigetelésen helyezkedik el. Általában tetőfelújításoknál alkalmazzák, mert a belső nedvességterhelésekre különösen érzékeny.

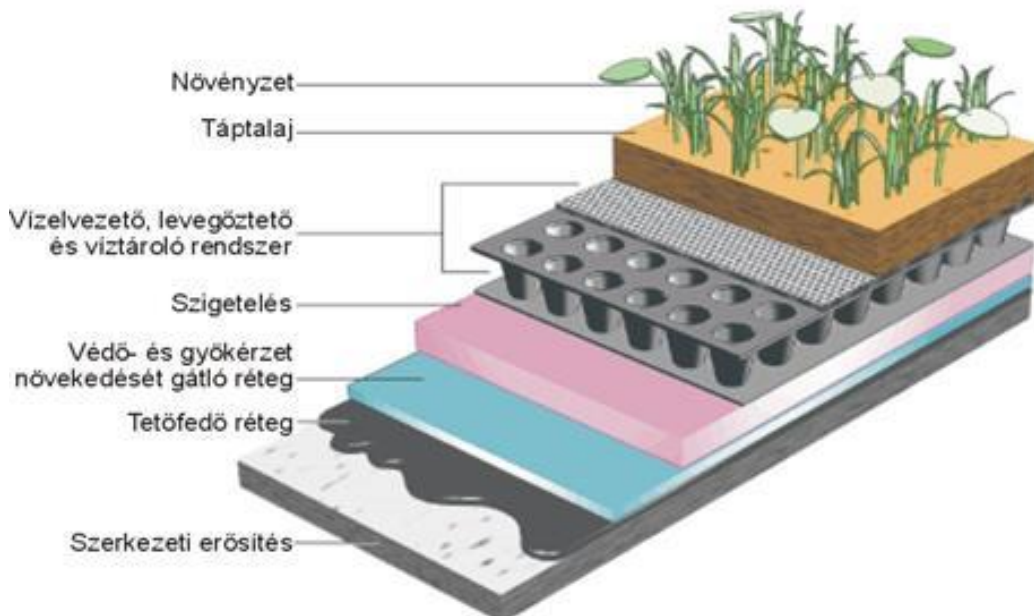
Fordított rétegrendű tető: vízszigetelés a hőszigetelés alatt helyezkedik el. Páratechnikai szempontból sokkal kedvezőbb, csökken a rétegszám, egyszerűbb a kivitelezés.

Duo tető: kettős hőszigetelést építenek be, ahol a nedvességre érzékeny hőszigetelő anyag a csapadékvíz szigetelés alá, a nedvesség álló, fordított rétegrendű tetőknél ismertetett módon fölé kerül.

(Megemlítendő, hogy elvileg kéthéjű hidegtetők is készülhetnek zöldtetőként, bár ezek felső héja többnyire nem alkalmas további állandó terhek viselésére. Kivételek természetesen akadnak, és a csupán néhány centiméter vastagságú, paplanszerű vegetációs réteggel készített extenzív zöldtetők ilyenkor is megvalósíthatók.)

### 2.4. Zöldtető rétegei

A zöldtető szokásos rétegeinek elhelyezkedését a **2.4. ábrán** láthatjuk. Az egyes rétegek jellemzőit a következőkben ismertetem.



2.4. ábra Zöldtető rétegeinek komplex szerkezete [82]



### **2.4.1. Ültetőközeg**

Zöldtetők létesítésekor aránylag csekély vastagságú talajréteget tudunk felhordani a tetőre, mégis azt kívánjuk, hogy zöldüljön, virágozzon a kert. Így speciális talajkeveréket kell készítenünk.

#### **2.4.1.1. Hagyományos talajkeverék**

A homok és az agyag keveréke, vagy a közepes szemcse nagyságú alkotórészekből álló föld a megfelelő. A víztároló képesség fokozására perlitet lehet használni. A talaj táplálóképessége az ásványi szemcsék és a humuszanyag bomlásából adódik.

#### **2.4.1.2. Korszerű talajkeverékek**

Az egyik változatnál szerves és szervetlen anyagokat egyaránt használnak a csíráltatott talajkeverék elkészítésére. A leggyakoribb szerves alkotó a humusz, tőzeg és az örölt fakéreg. A szervetlen anyagok közül pedig a láva, a tufa, a duzzasztott agyag és pala, téglá-, és cseréptörmelékek a leggyakrabban használatos alkotóelemek.

A másik változatnál kizárólag szervetlen anyagokat használnak a talajkeverék összeállításánál.

### **2.4.2. Szivárgó-, vagy vízmegtartó réteg**

A szivárgó réteg feladata kettős. Egyrészt a lefolyórendszer felé vezeti el a fölösleges csapadékmennyiséget, amely a vegetációs rétegből szivárog ki, ezzel megakadályozva a pangó vizek kialakulását, másrészt megköti, tárolja a növények fejlődéséhez szükséges vizet.

#### **3.4.2.1. Napjainkban használatos szivárgórétegek típusai**

**Szivárgóréteg természetes ásványi anyagokból.** A zárt pórusú természetes kövek apró kavics és zúzalék formában (ahogy az útépitésben használják) a zöldtetők számára csak részben megfelelőek. Alig van vízviasszatartás, az anyagok nagy sűrűségűek; azon kívül minden esetben szükséges kiegészítő védőrétteg. Mivel azonban leggyakrabban helyben olcsón elérhető, mindenképp olyan intenzív tetőkertnél használják, ahol megfelelő tartalék terhelés áll rendelkezésre és a szivárgórétteg akár burkolatok tartóréttegeként is használható.

A homok és kavics a zúzalékhoz hasonló tulajdonságokat mutat. Gömbölydedebb szemcsealakjuk miatt csekélyebb keménységet céloznak meg velük, ezért rendszerint elmaradhat a kiegészítő védőrétteg. Egyedi esetekben, pl. megfelelően tartóképes tetőszerkezetek esetén, a tetőn már meglévő kavics védőrétteg megtartható és szivárgórétteggént beépíthető.

A láva és a tufa nyílt pórusú természetes anyagok, amelyek porózus szerkezetükből adódóan belsejükben képesek vizet tárolni. Vízzel telített állapotban tömege ennek ellenére rendszerint kisebb, mint a kavics-homok-, illetve zúzalék-kavics-keverékeké.

A láva esetében különösen figyelni kell arra, hogy a vízszigetelés ill. a gyökérvédő réteg biztosan védett legyen, mert az éles részecskék a föliát vagy a szigetelőanyagot átszúrhatják.

#### **Szivárgórétteg szintetikus ásványi anyagokból.**

Az ebbe a csoportba tartozó drén anyagok rendszerint agyagból, szerves anyag hozzáadásával készülnek, égetéssel. Nagy a pórustérfogatuk és alacsony sűrűségük alapján különösen ott alkalmasak szivárgórétteg alkotására, ahol alacsony tömeg mellett jelentős drénfunkciót kell biztosítani.

A töretlen, golyó alakú, duzzasztott agyagkavics és pala kevés vizet vesz fel, csak a felületén képes a víz megtapadni, (kb. 10 térf.-%) és ezért csak csekély mértékben tudnak hozzájárulni

a zöldtetők vízellátásához. Ellenben ezeknek a zúzott, tört változatai kétszeres vízmennyiséget képesek felvenni a kiindulási anyaghoz képest. A vegetáció szempontjából ezért megítélésük pozitívabb. Szem előtt kell tartani azonban, hogy a tört agyagszemcsék élei miatt szükséges a védőréteg elhelyezése. Lapos és nagyon kis lejtésű tetőknél szűrőfátyollal fedjük le a szivárgórétet. Ezzel megakadályozható, hogy a finom talajszemcsék bekerüljenek a szivárgórétbe. Meredek hajlású tetőknél általában fölösleges az óvintézkedés, hiszen a szivárgás gyorsaságát felerősíti az erős lejtés. Ezen kívül kifejezett előnyökkel is járhat a talaj és a szivárgórét összekeveredése: jelentősen csökken annak a veszélye, hogy a talaj lecsúszik/lemosódik szivárgórétről; a növények gyökereinek pedig egyenletesen nedves, kiegyensúlyozott életteret biztosít.

A talajréteg és a szivárgórét szétválasztásával (szűrőfátyol) a túl hosszúvá nőtt gyökerek néha „vízben” úsznak, néha pedig léggökéreként szárazon lógnak a levegőben. Sok növény - különösen a fűfélék - számára mindkét eset kedvezőtlen, mert gátolja az egyenletes növekedést.

### **Szivárgórét ásványi újrahasznosított anyagokból.**

Kiváltképp a zöldtetőknél kellene a természeti forrásokkal történő takarékos bánásmódra ügyelni. Érdemes a zöldtetőhöz használatos különféle ipari nyersanyagoknak utánagondolni, mert ezzel a természetes lelőhelyek védhetők és csak kevés energiaráfordítás szükséges az anyagok előkészítéséhez.

Az ipari nyersanyag-törmelékéből készült anyagok a beton, falazat vagy téglalapanyagtól függően eltérően alkalmasak a szivárgórétbe történő felhasználásra. Kedvező tulajdonságokat mutat az újrahasznosított téglalapanyag, mivel viszonylag alacsony tömege mellett 10 térf.-%-ig képes vizet raktározni.

Az újrahasznosított anyagoknál mindig kérjük el az FLL-tanúsítványt, amely bizonyítja, hogy a kimosható mézrészecskék nem rakódnak le a lefolyókban. Ha salakot használnak szivárgórétként, ügyelni kell arra, hogy az lehetőleg porózus anyag legyen. Tapasztalat szerint, pl. az erőművekből származó, megfelelő szemcseméretű anyagok használhatók. A zúzott ill. törmelékanyagok víztároló képességük miatt előnyösek.

A szemétegetők salakanyaga beltartalma alapján a mai nézetek szerint kevésbé alkalmas zöldtetők kivitelezésére. Kérdéses esetben kérjük el az FLL-tanúsítványt.

A hulladék üvegből készült habüveg drénként történő használata különösen ott fontos, ahol a drénrétegnek hőszigetelő tulajdonsággal is rendelkeznie kell. A habüveg burkolatok alépítményeként is felhasználható. Az anyagot töltőanyagként, a kavics-zúzalék keverékhez hasonlóan használják. A habüveg csekély mennyiségű vizet vesz fel (kb. 5 térf.%) és egyike a legkönnyebb ásványi drén-alapanyagoknak. Ferde tetőknél a szűrőréteg stabilitását erősíti, ha a szemcsék alakja nem szabályos, hanem éles, rovátkolt felületű. A különböző drénanyagok terhelését a **2.1. táblázatban** találjuk.

### **2.1. táblázat: Ásványi drénanyagok terhelése beépített állapotban, teljes víztelítettség mellett [16]**

Anyag	Szemcseméret (mm)	Terhelés m <sup>2</sup> -enként, 10 cm rétegvastagságban (kg)
Kavics és zúzalék	2-8; 2-12; 4-16	150-180
Homok és kavics	2-8; 2-12; 4-16	150-180
Láva	2-8; 2-12; 4-16	120-140
Tufa	2-8; 2-12; 4-16	80-120
Ép agyagkavics	2-8; 2-12; 4-16	50-70
Zúzott agyagkavics	2-8	60-80
Ép, puffasztott pala	2-8; 2-12; 4-16	60-70

Zúzott, puffasztott pala	2-8	70-80
Téglatörmelék	2-8; 2-12; 4-16	110-130
Zúzott szénsalak	2-8; 2-12; 4-16	90-110
Habüveg	5-40	25-35

### Szivárgóréteg műanyagból

A kereskedelemben műanyag matracok és lemezek kaphatók, amelyek rendszerint csekély vízfelvevő kapacitással rendelkeznek és túlnyomórészt újrahasznosított anyagokból állnak. Az ömlesztett ásványi anyagokkal szemben a szivárgóréteg vastagsága nem módosítható egyedileg, hanem a gyári készmérettől függ. A műanyag drénlemezek könnyen megmunkálhatók, részben hőszigetelő tulajdonságúak, azonban kevésbé tartják vissza a vizet. Ha szálfonadékpaplant használnak a szivárgóréteg, akkor az legalább 20 mm vastag legyen. Fátyolszövet-kasírozással vagy a nélkül is kaphatók. Az anyag 1,00 m széles tekercsekben kerül forgalomba és kiváltképp olyan esetekben ajánlott, ahol a tetőszerkezetnek nagy páraáteresztő képességgel kell rendelkezni, pl. fordított rétegrendű tetőknél. Kis súlyuknak köszönhetően könnyen megmunkálhatók, ez különösen ott fontos, ahol szükséges a kézi munkaerő. Egyidejűleg védőréteggént is működnek. Megmunkálásukkor ügyelni kell arra, hogy a tető szintjében 1 cm-nél nagyobb eltérés ne legyen, különben a felette elhelyezett vegetációs rétegben pangó vizek alakulnak ki és ez vizesedéshez, ill. növénypusztuláshoz vezethet.

A formasajtolt lemezek 25, 40 és 60 mm-es vastagságban kaphatók. A drénlemezek rekeszei ásványi anyaggal feltölthetők (pl. agyagkavics), amely így bizonyos víztározást biztosít. Az újrahasznosított PE-ből készült elemek mérete 1,00 x 2,00 m és gond nélkül lehet velük dolgozni. A 25 mm vastagságú elemeknek első sorban a nagyobb lejtésű tetőknél van jelentőségük, továbbá felületi tagoltságuk által a csúszásvédelemhez is hozzájárulnak.

Az anyagok keménysége a vízszigetelés további védelmét szolgálja.

A zárt pórusú habosított drénlemezek leggyakrabban újrahasznosított expandált polisztirolból készülnek. A szigetelés védelme mellett csekély súlyukkal és 50, 65, 75, 100 és 140 mm-es vastagságukkal bizonyos mértékű hőszigetelő hatást is gyakorolnak. E tulajdonságuk miatt részben megengedett a habosított elemek használata fordított tetőkön. A lemezek mérete általában 1,00 x 1,00 m.

Az anyag jelentéktelen mennyiségű vizet képes csak felvenni; a profilozott lemezek esetében azonban a kis vályúkban bizonyos mennyiségű vízmegtartás lehetséges.

Az anyagok lapos és ferde, intenzív és extenzív tetőkre egyaránt alkalmasak. Különösen olyan utólagos zöldtető-kivitelezéseknél van jelentőségük, ahol a szivárgóréteg az adott tetőszerkezet gyenge hőszigetelését fel kell javítania úgy, hogy a meglévő szigetelést ne kelljen eltávolítani.

A polietilénhabból készült habpelyhymatracok alapvetően újrahasznosított anyagok; 30 mm-es vastagságban és 1,00 m széles tekercsekben kaphatók. Csekély víztározó képessége és súlya alapján véve az extenzív tetőkön történő alkalmazásra teszi alkalmassá, valamint olyan helyeken, ahol kiegészítő mechanikai védelem szükséges. Az alacsony építési magasság megköveteli a sík tetőszerkezetet. Ezt a lemezt egyik oldaláról rákasírozott fátyollal hozzák forgalomba, így ezzel egyszerre védő-, szűrő- és szivárgóréteg. A lemez alsó oldala profilozott, ezzel biztosított a többlet víz gyors lefolyása.

A poliuretánhabból készült habpelyhymatracok 35 mm-es vastagságukkal és nyitott pórusaikkal jelentős mennyiségű (kb. 60 térf.% vizet) képesek raktározni. Mivel anyagukhoz szerves kiegészítőket és tápanyagokat is hozzákevernek, nemcsak szivárgóréteggént, hanem egyidejűleg vegetációs réteggént is szolgálnak. Rendszerint, különösen a vékony réteg-felépítésű extenzív tetőknél, alsó vegetációs réteggént használják. Az 1,00 x 1,00 m-es lemez

alsó oldala a jobb vízvezetés érdekében profilozott. Nagyobb lejtésű tetőknél, ahol a víz amúgy is gyorsan lefolyik, a lemez profilozott oldalával felfelé is elhelyezhető, ez védelmet nyújt az erózió ellen. A **2.2. táblázat** áttekintést nyújt a terhelhetőségről és az építési vastagságról.

#### 2.4.2.2. A szivárgórétegek vastagsága és szemcseeloszlása

A műanyag drénlemezek esetében a vastagság gyárilag meghatározott. Az ömlesztett anyagoknál a rétegvastagságot és a szemcseeloszlást a mindenkori igényekhez tudjuk igazítani.

Alapjában véve megállapítható, hogy a 3-15 cm közötti vastagság elegendő. Ahhoz, hogy funkciója megfelelően biztosított legyen, az ömlesztett anyag csak kis mennyiségű iszapszemcsét tartalmazhat (az [10] alapján legfeljebb 2 tömeg%). A szemcsenagyság a rétegvastagságra utal. A különféle lejtésű tetőkhöz és zöldtető típusokhoz a **2.3. táblázatban** bemutatott építésmódok beváltak.

Amennyiben előre látható, hogy víztorlódás alakul majd ki, a 4-16 mm-es szemcseméret ajánlott, különben a kapillárisokon feljutó víz a vegetációs réteg elvizesedéséhez vezethet.

A szivárgórétegek elhelyezésekor ügyeljünk arra, hogy 4 m-en belül a szinteltérés 1 cm-nél nagyobb ne legyen. Ez különösen a sekély rétegű extenzív zöldtetőkre vonatkozik.

**2.2. táblázat: Műanyag drénrétegek terhelhetősége [16]**

Anyag	Vastagság mm-ben	Teher vízzel telített állapotban (kg/m <sup>2</sup> )
Szálfonadékpaplan	20	2
Kemény műanyag agyagkavics töltéssel (2-8 mm)	25	15
	40	20
	60	25
Habosított drénlemezek	50	2
	65	2,5
Profilozott habosított drénlemezek agyagkavics töltéssel (2-8 mm)	75	25
	100	35
	140	50
PE habpelymatracok	30	6
Habpelymatracok módosított poliuretánból	35	25

**2.3. táblázat: Szivárgórétegek rétegvastagságai és szemcseméretei [14]**

Tetőlejtés és zöldtető típus	vastagság	szemcseméret
Extenzív zöldtető, legalább 2% lejtéssel	3 cm	2-8 mm
Extenzív zöldtető, lejtés nélkül	5 cm	2-12 mm
Intenzív zöldtető, legalább 2 %-os lejtéssel	10 cm	4-12 mm
Intenzív zöldtető, lejtés nélkül	13 cm	4-16 mm

Az elmúlt években kifejlesztettek olyan kemény polisztirolhabból készült elemeket is, melyek mélyedésekkel kialakított felső felülete képes elvezetni, ill. tárolni a csapadékot. Ezek az elemek is beszámíthatók a tető hőszigetelő képességének meghatározásába. Az ilyen kialakítású elem hőszigetelő képessége megfelel egy átlagosan fele akkora vastagságú sima hőszigetelő elemének. Enyhe lejtésű lapostetőkön ezek a szivárogtató elemek nyíróerő felvételére is alkalmasak. Az elemek anyagköltsége viszonylag magas, ezzel szemben

viszonylag gyorsan elhelyezhetők. Az ilyen típusú szivárogtató-hőszigetelő elemeknek az élettartamát egyelőre még nem ismerjük.

### **2.4.3. Szűrőréteg**

Ez a réteg meggátolja, hogy a finom szemcsés talaj-, vagy tápanyagrészecskék a tetőföldből a vízmegtartó rétegbe mosódjanak és annak vízáteresztő képességét csökkentsék. A technika jelenlegi állása szerint a zöldtetők szűrőrétegeként műanyag- vagy üvegfátyol használható. A szűrőréteget lehet közvetlenül a drénlemezhez kasírozni, de lehet külön lépésben is a drénrétegre teríteni.

### **2.4.4. Elválasztó réteg**

A réteg funkciója a felületkiegyenlítés illetve az aljzat és a szigetelés elválasztása lehet. Anyaga általában nem szőtt műanyagfátyol, vagy filc. Fordított rétegrendű tetőknél akkor szükséges, ha a csapadékvíz szigetelés laza átlapolással van fektetve. Egyenes rétegrendű tetőknél főként a hőszigetelés és csapadékvíz szigetelés elválasztásához használják.

### **2.4.5. Csúsztató réteg**

Megakadályozza az egymáson fekvő rétegek nem kívánatos tapadását, csökkentve ezzel az anyagokban fellépő nyíróerőket.

### **2.4.6. Gyökéráthatolás elleni védőréteg**

Ez a réteg az épület szerkezet zöldtető alatti részét védi a zöldtetőből származó különféle károsító hatásoktól. Ilyenek például a nedvesség, ami ebben az esetben már nem közönséges csapadék víz, hanem a különféle a talajból kioldott ásványok hatására akár kémiaiag agresszívvé váló vizes oldat, továbbá a gyökérzet növekedésének is ez a réteg kell, hogy határt szabjon. Feladata a szigetelőlemez tartós védelme a növények be- és áthatolásával szemben. Továbbá meg kell felelnie az FLL által előírt 4 éves gyökérállósági vizsgálatnak [16], amely gyökérvédő lemezek, szigetelőlemezek, illetve a folyékony állapotban felhordott bevonatszigetelések ellenállóságának meghatározására szolgál.

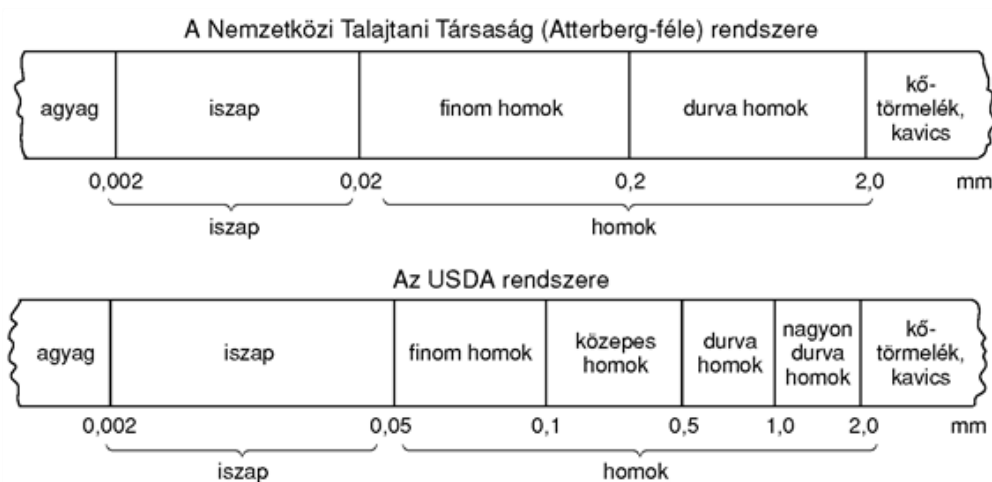
### 3. Talaj fizikai tulajdonságainak jellemzői és azok mérése

#### 3.1. A talaj szemcseösszetétele

A talajok szilárd fázisában igen sokféle méretű összetevő található. Ezeknek a különböző méretű szemcséknek a mennyisége, illetve az egymáshoz viszonyított aránya döntően befolyásolja a talaj fizikai tulajdonságait. Egészen más feltételek alakulnak ki a talajban, abban az esetben, ha főként durva homokszemcsék alkotják, vagy akkor, ha kolloid méretű szemcsék dominálnak. A szemcseösszetétel azonban nem úgy alakul, hogy éles határok vannak az egyes mérettartományok között, hanem fokozatos és folyamatos az átmenet. A fizikai tulajdonságok bizonyos mérethatárok fölött illetve alatt nagymértékben változnak, ezért nem a szemcsék egyedi méretét, hanem az egyes mérettartományokba eső szemcsecsoportokat, frakciókat kell figyelembe vennünk.

A szemcsék méret szerinti csoportosítására két elterjedt változat létezik. Az egyik az ún. Atterberg-féle csoportosítás (ld. **3.1. ábra**), amelyet a Nemzetközi Talajtani Társaság is elfogad, valamint nálunk is alkalmaznak, a másik pedig az Egyesült Államokban használt osztályozás. A következő ábra mutatja a két osztályozást [70].

A szakirodalom részletesen tárgyalja az egyes frakciók ásványi összetételét, amely nagyban befolyásolja például a szemcsefrakciók fajlagos felületét. Utóbbi azért nagyon fontos a zöldtetők szempontjából, mert ez szabja meg a vízmegkötő képességet és az adszorpciós tulajdonságokat. A fajlagos felület értéke meghatározható közvetlen méréssel vagy számítással becsülhető és tömeg- vagy térfogategységre vonatkoztatva kifejezhető.



**3.1. ábra** A szemcsefrakciók mérethatárai az Atterberg és az USDA osztályozás szerint [71]

A számításoknál úgy járnak el, hogy az agyagrészecskéket vékony lapokból állónak, a többi szemcsét pedig kocka vagy gömb formájúnak feltételezik. A fajlagos felület fordítottan arányos a szemcsemérettel és természetesen függ a részecskék alakjától is.

Az előzőekből következik, hogy a kis fajlagos felületű homokszemcsék között csak jelentéktelen tapadóerő lép fel. A részecskék közötti tág hézagok miatt a homok a vizet jól vezeti, de abból csak keveset tud visszatartani. A pórusok nagy részét átnedvesedés után is főleg levegő tölti ki. Az iszapfrakcióban már sokkal nagyobb a szemcsék közötti összetartó erő. A részecskék méretéből adódóan a pórustér szűk hézagokból áll, ezért az iszap vízáteresztése már jóval csekélyebb, mint a homoké, vízvisszatartó képessége azonban

jelentős.

A legkisebb szemcsékből álló agyagfrakciónak nemcsak a fajlagos felülete nagy, hanem számottevő elektromos töltéssel is rendelkezik. Éppen ezért a szemcsék közötti tapadóerő igen nagy és a részecskék felületén is sok víz tud megkötődni. Az agyagok emiatt nedvesen duzzadnak, kiszáradva zsugorodnak és keménnyé válnak. A pórusok az agyag esetében minimális méretűek, ezért a vízáteresztése rossz, vagy sok esetben egyáltalán nem vezeti a vizet. Ebből kifolyólag az agyagfrakció a legjobb vízmegtartó képességű.

Az előzőekből kifolyólag nyilvánvaló, hogy önmagában egyik frakció sem képes olyan optimális talajt alkotni, amely megfelel a zöldtető követelményeinek, ehhez a homok-, iszap- és agyagrészecskék megfelelő arányú, együttes megléte szükséges. Természetesen ezen kívül a megfelelő minőségű és összetételű szerves anyag elengedhetetlen a zöldtető növényzete számára ahhoz, hogy önfenntartó módon, egy hosszú távú természetes záró réteget alkosson épületeinken.

### 3.1.1. A szemcseösszetétel meghatározásának elve

A talajok szemcseösszetételét a mértékadó frakciók tömegszázalékban kifejezett mennyiségével adjuk meg. Az eljárás során a durva szemcséket szitálással választják el, a finomabb szemcséket pedig általában ülepitéssel különítik el.

A légszáraz talajból szitálással a kavicsot és a kötőrmelékét, míg a talaj vizes szuszpenziójának átszitálásával a durva homokot távolítják el. Előbbit nevezzük száraz szitálásnak, utóbbit pedig nedves szitálásnak. [34]

A kisebb szemcséjű frakciók ülepitésének alapja, hogy a nyugvó folyadékban a különböző méretű és sűrűségű szilárd részecskéknek az ülepedési sebessége is eltérő. Ezt az összefüggést a Stokes törvény fejezi ki [74]:

$$v = \frac{2 \cdot g \cdot [\rho_1 - \rho_2] \cdot r^2}{9 \cdot \eta} = k \cdot r^2$$

ahol:  $v$  = az ülepedési sebesség, cm/s

$g$  = a gravitációs gyorsulás, 9,81 cm/s<sup>2</sup>,

$\rho_1$  = a szemcse sűrűsége, g/cm<sup>3</sup>,

$\rho_2$  = az ülepitő közeg sűrűsége, g/cm<sup>3</sup>,

$\eta$  = az ülepitő közeg belső súrlódási együtthatója, centipoise

(víznél, 20°C-on = 0,01 és 25°C-on = 0,009)

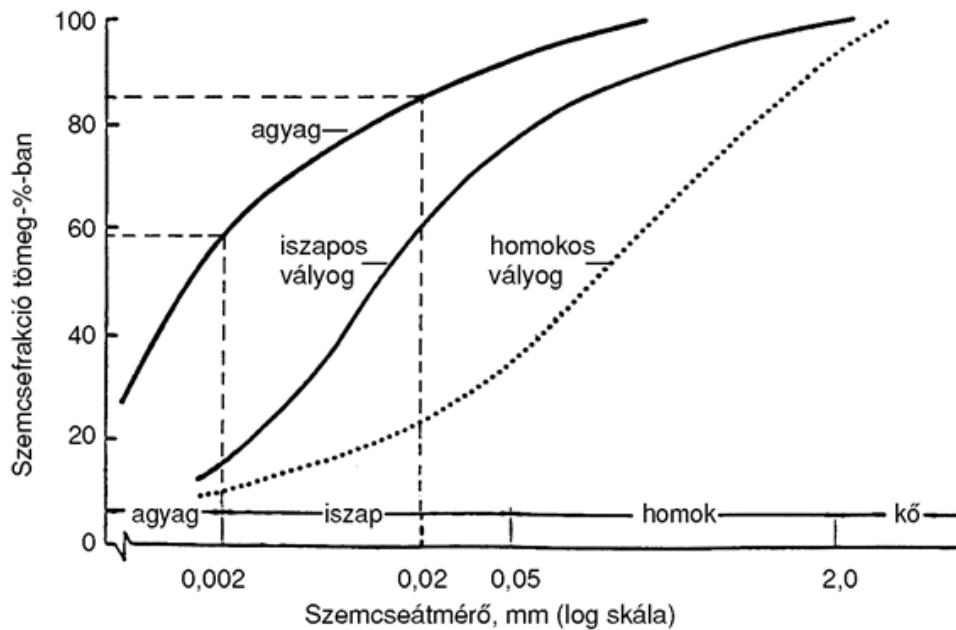
$r$  = a részecske sugara, cm,

$k = 2 g(\rho_1 - \rho_2)/9\eta$ , amely adott rendszernél csak hőmérsékletfüggő állandó.

Mivel egy-egy frakciónál az ülepedési sebességet, az ülepedési úthossz és az ehhez szükséges idő hányadosa adja meg, azaz

$$v = \frac{h}{t} = k \cdot r^2,$$

a  $t=h/v$  összefüggés alapján ki lehet számítani, hogy meghatározott méretű részecskék adott



3.2. ábra A szemcsefrakciók eloszlása [70 ]

mélységig mennyi idő alatt ülepednek le. A szemcseösszetétel megállapítására használt két legelterjedtebb módszer a pipettás és a hidrométeres eljárás.

A pipettás módszernél a megfelelő ülepedési idő elteltével meghatározott mélységből ismert térfogatú szuszpenziót kell kipipettázni, majd szárítás után meg kell mérni a szemcsefrakció tömegét. Ezután az eredményt 100 g talajra vonatkoztatva fejezzük ki. A különböző szemcsefrakciók arányának meghatározásához a műveletet az adott mélységben különböző időpontokban meg kell ismételni, így megkapjuk a finom homok, az iszap és az agyag %-os mennyiségét.

A hidrométeres eljárásnál megfelelően kalibrált hidrométerrel mérik a talajszuszpenzió sűrűségének időbeli csökkenését. Adott időpontban minél több a lebegő rész, annál nagyobb a szuszpenzió sűrűsége. A mérési adatokból nomogramok segítségével állapítható meg a szemcsefrakciók mennyisége.

A vizsgálati eredmények bemutatására a 3.2. ábrán lévő diagram szolgál.

A talajokat a szemcseösszetétel alapján a frakciók szerint további alcsoportokba sorolhatjuk attól függően, hogy az egyes frakciók milyen arányban szerepelnek bennük. A következő táblázat a talajfajtákat mutatja a frakciók függvényében és ehhez kapcsolódó további jellemzőiket.

A leiszapolható rész az agyag- és iszapfrakciót jelenti tömeg%-ban,  $h_y$  pedig a higroszkóposági érték, amely a légszáraz talaj által a légtérből megkötött nedvességet jelenti tömeg%-ban (ld. 3.1. táblázat)



**3.1. táblázat. A textúra osztályok megállapítására szolgáló talajfizikai jellemzők határértékei [11]**

Textúracsoport	Leiszapolható rész% (<0,02 mm)	$h_y$ %
Durva homok	< 10	< 0,5
Homok	10-20	0,5-1,0
Homokos vályog	20-35	1,0-2,0
Vályog	35-60	2,0-3,5
Agyagos vályog	60-70	3,5-5,0
Agyag	70-80	5,0-6,0
Nehéz agyag	> 80	> 6,0

### 3.1.2. A talaj pórustere

A talaj szerkezetében a hézagok többsége összeköttetésben van egymással, így összefüggő pórusrendszert alkotnak. Ez a pórusrendszer nem egyenletes keresztmetszetű járatokból áll, mérete pontról pontra változik. A pórusteret részben víz, részben talajlevegő tölti ki. A talaj víz- és levegőgazdálkodását döntően befolyásolja a pórusok összterfogata, valamint a különböző méretű hézagok egymáshoz viszonyított aránya.

Az összporozitás a talajban lévő pórusok összessége, amely legegyszerűbben számítással határozható meg. Ehhez két adatot kell ismernünk, egyrészt a talaj térfogattömegét, másrészt a szilárd fázis sűrűségét. A térfogattömeg ( $\rho$ ) a 105°C-on szárított, bolygatatlan szerkezetű talaj fajlagos tömege (az egységnyi térfogatú száraz talaj tömege), azaz

$$\rho = \frac{m}{V},$$

ahol  $m$  a talaj száraz tömege,  $V$  pedig a minta térfogata. Ez a mérés a rendszer pillanatnyi állapotára jellemző értéket ad, ami többnyire 0,8-1,7 között van. Átlagértéke 1,45 g/cm<sup>3</sup>. A szilárd fázis sűrűsége ( $\rho_{sz}$ ) a részecskék egységnyi térfogatának tömege. Mivel az ásványi rész túlnyomó többségét alkotó szilikátok sűrűsége egymáshoz hasonló, a talajok sűrűsége nem mutat olyan nagy eltéréseket, mint a térfogattömeg. Általában 2,6-2,65 g/cm<sup>3</sup> körüli. A nagy szerves anyag tartalom mind a térfogattömeg, mind a sűrűség értékét csökkenti. Ha tehát a két értéket ismerjük, akkor a  $100 \cdot (\rho/\rho_{sz})$  összefüggés megadja a szilárd részecskék %-os arányát, amit kivonva a 100%-ból, megkapjuk a pórustér %-os értékét. A talaj összporozitásának értéke 35-70% között van, kedvező esetben 50-60%.

### 3.2. A talajok vízgazdálkodása

A talajok vízgazdálkodását a bennük tárolható víz mennyisége, annak mozgékonyasága (növények általi felvehetősége), valamint a nedvesség térbeli és időbeli változása alapján lehet jellemezni. A talajnedvesség (folyékony fázis) közvetlen kapcsolatban áll a talaj szilárd és légnemű fáziséval, valamint a növények gyökérrendszerével.

A talaj nedvességtartalmát úgy határozhatjuk meg, hogy a nedves talajminta tömegéből kivonjuk a 105-110°C-on szárított talaj tömegét. Ezt kifejezhetjük mind tömeg, mind térfogatszázalékban is.

Fontos jellemzője a talaj vízgazdálkodásának a relatív víztartalom, amely azt jelenti, hogy adott nedvességtartalomnál a pórustér hány százalékában van vízzel kitöltve.

### 3.2.1. A talaj vízkapacitása

A vízkapacitás azt a vízmennyiséget jelenti, amit a talaj visszatartani, befogadni képes. A vizsgálati körülmények szerint szabadföldi és maximális vízkapacitást különböztetünk meg.

A szabadföldi vízkapacitás az a vízmennyiség, amit a talaj beázás után, a gravitációval szemben, természetes környezetben vissza tud tartani. Azt mondhatjuk, hogy ebben az állapotban a 10 µm-nél nagyobb átmérőjű pórusok már levegőt tartalmaznak. A maximális vízkapacitás a talaj pórusterét teljesen kitöltő víz mennyisége. Ekkor kétfázisú talajról beszélünk, hiszen a rendszer nem tartalmaz gáznemű fázist.

A maximális és szabadföldi vízkapacitás különbsége tehát a leszivárogni képes gravitációs víz mennyiségét adja meg, illetve a gravitációs pórusok összterfogatát mutatja. A maximális vízkapacitás mértékét a **3.2. táblázat** mutatja. Az intenzív zöldtető talaja a sűrűbb növényzet miatt nagyobb mennyiségű vizet képe megkötni.

### 3.2. táblázat: Vegetációs táptalaj maximális vízkapacitása tömörített, illetve beépítési állapotban [11]

Vegetáció és rétegfelépítés szerint	Max. Vízkapacitás
Intenzív	= 45 térf.-%
Extenzív	
-többrétegű*	= 35 térf.-%
-egyrétegű**	= 20 térf.-%

\*olyan építésmód, amely egymástól függetlenül kialakított szivárgó-, és szűrőrétegből, valamint ültető közegből épül fel. \*\*olyan építésmód, ahol az ültetőközeg a szivárgó- és a szűrőfeladatokat is ellátja.

### 3.2.2. Nedvességformák

A kötőerők nagysága és a víz mozgékonyasága szerint, talajfizikai nézőpontból, a következő nedvességformákat lehet megkülönböztetni.

#### a) Kötött víz

Szorosabb értelemben csak a talajrészecskék felületi erői által megkötött vízfilmet nevezzük kötött víznek, tágabb értelemben azonban ide kell sorolni a kémiaileg kötött, szerkezeti vizet is, amely a 105°C-os szárítás után sem távozik el a talajból.

#### b) Kapilláris víz

A 0,2-10 µm átmérőjű kapillárisokban lévő, és a talajrészecskék érintkezési pontjainál visszatartott ún. póruszögletvíz tartozik ide. A kapilláris nedvességben jelentős mennyiségű növényi tápanyag és egyéb vegyület oldódik. Ezeket a talajban mozgó víz a kisebb nedvességtartalmú terek felé magával viszi. A kapillárisok feltöltődése a lefelé szivárgó vízből és a talajvízből, tehát alulról történhet. Az előbbit függő, az utóbbit támaszkodó kapilláris nedvességnek hívjuk.

#### c) Szabad víz

Szabad víz csak a kapilláris pórusok telítődése után jelenik meg a talajban, amely egyáltalán nem, vagy csak igen gyengén kötődik a szilárd fázishoz.

### 3.2.3. Nedvességpotenciál

A talajok vízháztartása leginkább a pórusnagyságok eloszlásától függ. A lehullott csapadék által a talajba jutott nedvesség részben a közép- és finompórusokban kötődik meg. Ezeket kötött víznek nevezzük. A víz többi része, mint szivárgóvíz a durva szemcséken keresztül a talaj mélyebb zónáiba jut, ahol zöldtetők esetében a szivárgórétegen keresztül el lesz vezetve. Megemlítjük, hogy a széles pórusok gyorsan víztelenítődnek (légkapacitás), a szűk pórusok ezzel ellentétben pedig lassan. A kötések erőssége is nő a csökkenő pórusnagyságokkal párhuzamosan (kapillárisvíz). A finompórusok ( $r < 0,2 \mu\text{m}$ ) nedvességpotenciálja 15.000 cm, illetve 4,2 pF körüli értéket mutat.<sup>1</sup> (magyarázat: "p" a logaritmusra utal, „F” a szabad energiára:  $pF = \log \text{cm}$ ) A finompórusokban lévő víz a magas nedvességpotenciálja miatt a növények számára nem elérhető. Ha víztartalom  $pF=4,2$ , akkor ezt állandó hervadáspontnak nevezzük. Ez azon állapotot írja le, amikor a növények transzspiráció útján leadott vizet a talajból már nem tudják pótolni. [81]

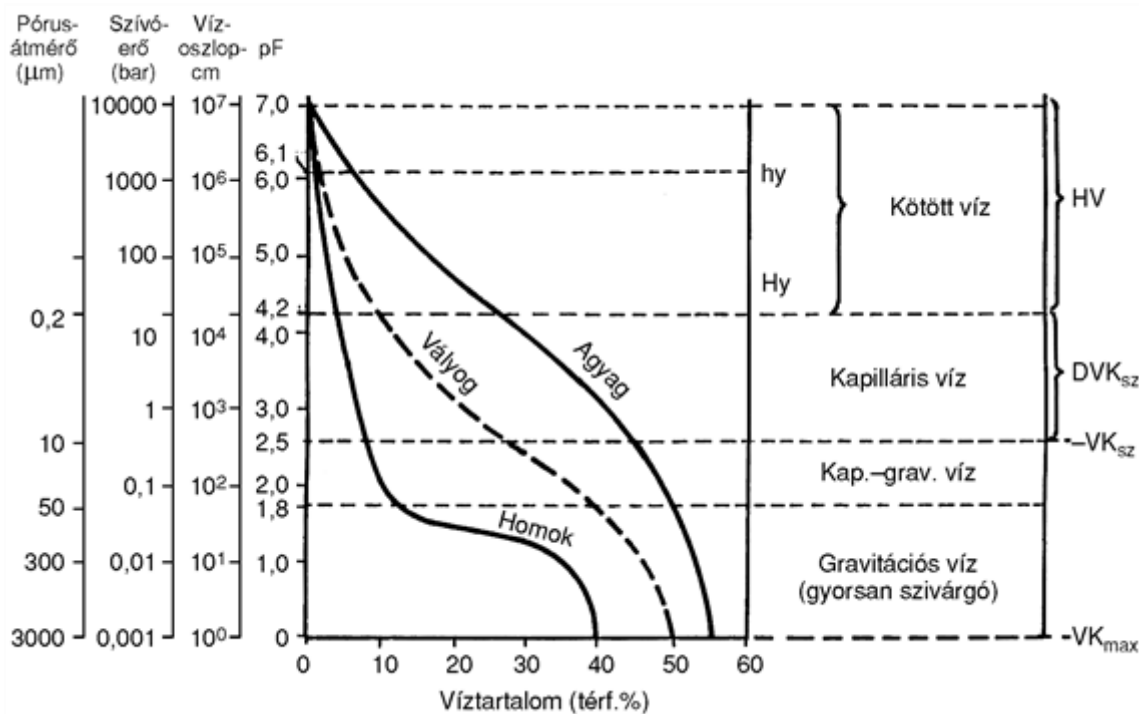
A középpórusokban lévő víz nedvességpotenciálja lényegesen kisebb, mint finompórusokban, így ez a növények számára elérhető tápanyag.

A szűkebb durva pórusokban lévő víz rövid ideig bár, de a vegetáció számára hozzáférhető (rövid idejű késleltetés). Ez utóbbi maga a vízmegtartó képesség. A hasznos vízmegtartó képesség [térf.-%] az állandó hervadáspontnál lévő vízmennyiség és vízmegtartó képesség hányadosa. Ez a mennyiség a középpórusok víztartamának felel meg (hosszúidejű visszatartás). A különböző talajok nedvességpotenciálját a **3.3. táblázatban** láthatjuk. A nedvességpotenciál és a víztartalom kapcsolatát a **3.3. ábra** mutatja különböző talajokra.

### 3.3. táblázat: Nedvességpotenciál a pórusnagyság függvényében [66]

Pórusnagyság	Nedvességpotenciál		pF
	Pórusátmérő [ $\mu\text{m}$ ]	Vízoszlop [cm]	
Széles durva pórusok	>50	0-60	0-1,77
Szűk durva pórusok	50-10	60-300	1,77-2,54
Középpórusok	10-0,2	300-15000	2,54-4,2
Finompórusok	<0,2	>15000	>4,2

1 A talaj víztartó képesség függvényének (pF-görbe) meghatározására szolgáló mérési módszert Magyarországon Várallyay György, kb. 30 éve alakította ki és vezette be. A pF-görbe meghatározására a mintavétel, a víztelítést követően a homok-, illetve kaolinlapos mérőedényekben, majd a nyomásmembrános készülékekben történő mérési eljárás leírása Várallyay munkáiban található.



**3.3. ábra A nedvességpotenciál és víztartalom közötti viszony (PWP: hervadáspon, FK: vízmegtartó képesség) [71]**

A növények által hasznosítható víz mennyisége megközelítőleg a maximális vízkapacitás és a talaj finom pórusaiban kötött víz mennyiségének különbözeteként kapható meg ( $pF > 4,2$  esetén, kb. 10-15 térf.%)

A vegetációs táptalajnál maximális vízkapacitás esetén a légtartalma nem kerülhet 10% alá. Ha az említett érték az alatt van, kiegészítésként 1,8 pF-nél (ami a durva pórusok részarányára utal) is meg kell vizsgálni a levegőtartalmat, amelyre az alábbi határértékek érvényesek.

### 3.3. Zöldtetők működése és annak motorja a vízháztartás

#### 3.3.1. Bevezetés

Mivel a zöldtetőkre felhordott ültetőközegnek nincs termett talaj kapcsolata, hosszú távon leromlik a táptalaj minősége, azaz elsavanyodik a közeg. Ezért igen fontos a vegetáció megfelelő tápanyag-utánpótlásának biztosítása. Ahhoz, hogy a növények számára elérhetőek legyenek a földrétegben lévő ásványi anyagok, a víz jelenléte nélkülözhetetlen. Ezen okból kifolyólag a víz tározása, illetve a gyökérszettel való közvetlen kapcsolatának biztosítása a zöldtetők építésénél elsődleges prioritást élvez, illetve kivitelezésének milyensége döntően meghatározza a zöldtető élettartamát és funkcionális teljesítőképességét.

#### 3.3.2. Vízvisszatartás

A vízvisszatartás az esővíz azon százalékos része, amelyik nem folyik el. Ez az érték vagy bizonyos évszakokra, vagy egy teljes évre vonatkozik, és megfelel a vízfolyás csökkenésének értékével. Ha pl. az éves vízvisszatartás 54%, akkor ez  $\psi_a = 0,46$  éves lefolyási tényezőnek (Függelék I, 1.4.) felel meg. Azt már tudjuk, hogy a tetőn növények vannak, a csatornázási szabványból azt is tudhatjuk, hogy a növényzettel telepített felület lefolyási tényezője  $\psi = 0,3$ . A lefolyási tényező a lehullott csapadéknak a csatornába jutó hányadát fejezi ki. A  $\psi = 0,3$  lefolyási tényező tehát azt jelenti, hogy a lehullott csapadéknak csak 30%-a folyik a csatornába. Összehasonlításként nézzük meg más felületek lefolyási tényezőit is a

Tetők	
Palafedés, fémlemez fedés, cserépfedés	$\psi = 0,90 - 0,95$
Nemjárható lapostetők	$\psi = 0,90 - 0,95$
Kavics leterhelésű tetők	$\psi = 0,50 - 0,60$
Zöldtetők	$\psi = 0,30$
Talajszint i burkolatok	
Aszfaltburkolat	$\psi = 0,85 - 0,90$
Kövezet	$\psi = 0,40 - 0,70$
Zúzottkő burkolat	$\psi = 0,25 - 0,45$
Talajszint i kertek, parkok	$\psi = 0,05 - 0,10$

### 3.4. ábra A nedvességpotenciál és víztartalom közötti viszony (PWP: hervadáspont, FK: vízmegtartó képesség) [28]

Az értékekből jól látható, hogy a tetők közül a zöldtető az előkelő első helyet foglalja el a tetőfelületek között, a rá hulló csapadéknak csak a 30 %-át „engedi” a csatornába, míg a legtöbb tető, akár magastető, akár lapostető csaknem az egészét: 90-95 %-át.

A tetőfelületen felgyülemlett vizet legtöbbször a csatornahálózatba vezetjük, amely egyrészt nagy ráfordítást (anyagi, technikai), illetve részleges vízkezelést igényel. Éppen ezért szükséges a már korábban említett ökológiai, mind pedig ökonómiai okok miatt, hogy a csapadékvíz megtartására, illetve hasznosítására alkalmas építőanyagokat, berendezéseket helyezzünk el, ezzel elérve, hogy a mesterséges öntözés szükségessége minimális legyen. Egyrészt az elszivárgott csapadékvíz táplálja a vegetációt, másrészt pedig tehermentesíti a csatornahálózatot.

A rétegfelépítésnek célja az kell, hogy legyen, hogy a növényeknek optimális csapadékvíz-felhasználási kereteket biztosítsunk. A csapadékvíz lefolyási mennyiségének csökkentése, a növények számára szükséges víz tárolása, illetve a többletvíz lefolyásának időbeli késleltetése, mind a zöldtetők alapvető működéséhez tartoznak.

Ezek a hatások az alábbi fizikai tulajdonságokkal szemléltethetők [12]:

Maximális vízkapacitás (Függelék I, 1.7.)

vízáteresztő képesség (Függelék I, 1.8.)

lefolyási együttható (Függelék I, 1.1.)

lefolyás-késleltetés éves lefolyási tényező (Függelék I, 1.4.)

Amennyiben statikai okokból, vagy gazdasági kényszerből a rétegvastagságot csökkenteni kell, akkor a tároló kapacitás, vagyis a rendelkezésre álló vízkészlet is jelentősen csökken. Az így szükségessé váló vízkészletezés, különböző rétegekben, és teljesen eltérő módon valósulhat meg. Az alábbi módokat különböztetjük meg:

Nagy vízmegtartó képességű adalékok alkalmazásával az ültetőközegben, vagy előkészített ültetőközeg tálcákban. Meghatározott szemcsenagyságú, nyitott pórusú töltőanyag felhasználásával. Az ültetőközegben, és a feltöltéses, vagy a tálcás rendszerű szivárgórégben alkalmazott felületi vízduzzasztás, illetve a drénprofilokban alkalmazott részleges duzzasztás által [13]

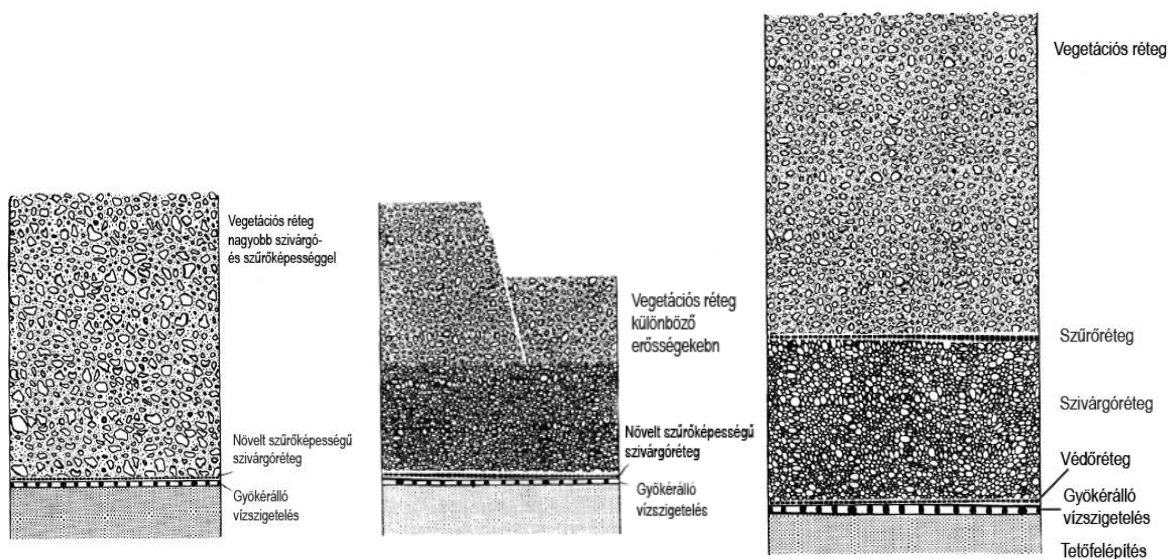
Ahhoz, hogy a talajrétegben felgyülemlett többletvizet a szivárgóréghez akadálymentesen el tudjuk vezetni, vagy egyrétegű kialakítás esetén megvalósulhasson az önszivárgás az anyagok vízáteresztő képességéről gondoskodni kell.

Az ültetőközegek vízáteresztő képességének összhangban kell lennie a tervezett szivárgórég

tulajdonságaival. Meghatározása a  $K_f$  modulus segítségével történik (Függelék I, 1.8). Irányadóként mindkét réteg gyorsan szivárgó pórusainak (durva szemcsék) nagyságát és eloszlását kell figyelembe venni. A kapillaris hajszálcsovek elvágását kerülni kell, a víz útjának biztosítása végett. [12] A talajréteget többféle módon lehet felépíteni. A **3.5. ábrán** az egy- két és háromrétegű építésmód látható.

### 3.3.3. Megfelelő pórustérfogat

A talajok vízháztartása leginkább a pórusnagyságok eloszlásától függ, mint azt korábban leírtam. A hasznos vízmegtartó képesség [térf.-%] (Függelék I, 1.10.) az állandó hervadáspontnál (Függelék I, 1.15.) lévő vízmennyiség és vízmegtartó képesség hányadosa. Ez a mennyiség a középpórusok víztartamának felel meg (hosszúidejű visszatartás).



**3.5. ábra Egyrétegű-, kétrétegű-, háromrétegű- építésmód**

A növények által hasznosítható víz mennyisége megközelítőleg a maximális vízkapacitás (Függelék I, 1.7.) és a talaj finom pórusaiban kötött víz mennyiségének különbözeteként kapható meg ( $pF > 4,2$  esetén, kb. 10-15 térf.-%). A vegetációs táptalajnál maximális vízkapacitás (Függelék I, 1.7.) esetén a légtartalma nem kerülhet 10% alá. Ha az említett érték az alatt van, kiegészítésként 1,8 pF-nél (ami a durva pórusok részarányára utal) is meg kell vizsgálni a levegőtartalmat (ld. **3.4. táblázat**), amelyre az alábbi határértékek érvényesek.

**3.4. táblázat: Ültetőközegek levegőtartalma maximális vízkapacitás esetén [15]**

Vegetáció/anyagcsoport	Légtartalom $pF=1,8$
Intenzív	
-talajkeverékben	= 15 térf.-%
-töltőanyagban	= 20 térf.-%
Extenzív	= 25 térf.-%

### 3.3.4. Vízvezetés

Magyarországon a szárazságra hajló mérsékelt égövi éghajlat főbb sajátosságai jellemzőek. A csapadék nagyobb hányada a nyári időszakban hull, a csapadékminimum általában valamelyik téli hónapra esik. A csapadék nagy időbeli és területi szórása következtében a növények vízellátottsága változó.

Zöldtetők vízvezetésénél az elsődleges cél, hogy a felgyülemlett csapadékvizet, amit a táptalaj és a szivárgó rendszer megköt, párologtatás útján „visszakapcsoljuk” a természetes körforgásba, így a lehullott víz csupán kis hányadát szükséges csatornába vezetni. Azon többlet vízmennyiség elvezetéséről, amely már nem tud elpárologni minden esetben gondoskodni kell. A vízvezetés méretezését a DIN EN 12056-3 és DIN 1986-100 szerint kell megoldani. Hagyományos tetőnél a lefolyási tényező (Függelék I, 1.1.) 1 ami 100 %-os vízvezetést jelent. Ez az érték lapos zöldtetőknél 0,1-0,5 között mozog rétegfelépítéstől függően. Ez a vízmennyiség vagy a víznyelőkön keresztül a csatornahálózatba folyik, vagy pedig szivárgórendszereken keresztül, közvetlenül a talajba kerül, duzzasztva ezzel a talajvizet. Itt meg kell említeni, hogy a lefolyt vízmennyiség minősége a különböző tápanyagok és nehézfémek miatt környezetvédelmileg káros folyamat.

### 3.3.5. Párolgás

A párolgás a vízkörforgalom része, ezért a körforgalom többi elemének ismeretében azokból becsülhető. A párolgás nagyságát ezzel a módszerrel kisebb-nagyobb területű térségekre becsülték. A vízkörforgalom elemeinek nagyobb időfelbontású ismeretével meghatározható a párolgás egy-egy időszakra eső nagysága.

A természetben lejátszódó párolgási folyamatokban a páraleadó alrendszer szerint megkülönböztetik a szabad vízfelület párolgását, a talajok párolgását (evaporáció, Függelék I, 1.11), a növényzettel fedett felületek párolgását (evapotranszspiráció, 7.1.13.), továbbá a növényeken felfogott csapadék párolgását (intercepció, Függelék I, 1.14.). Az evapotranszspiráció a növényzet párologtatásából (transzspiráció, Függelék I, 1.12.) és a növények között fedetlen talaj felületek párolgásából (evaporáció) tevődik össze. Zöldtetők esetében a víz a táptalajban és/vagy a szivárgórétegen tárolódik el. A középpórusokban megkötött víz (hosszú távú vízvisszatartás, használható vízmegtartó képesség) transzspiráció útján, a felületen megkötött víz evaporáció és intercepció útján kerül vissza a természetes vízkörforgásba [81] ,[55].

### 3.3.6. Öntözés

A természet ajándékaaként rendelkezésre álló csapadékvíz-hasznosítás képezi a zöldtetők vízkezelésének alapját, ezáltal csökken a kiegészítő öntözés alkalmasságának szükségessége, és a csapadékvíz visszakérül a természetes körforgásba. Míg azon vegetációknál, amelyek közvetlenül kapcsolatban vannak az anyafölddel a kiszáradás fentről lefelé történik a kapilláris nedvességzállítás miatt. Zöldtetős konstrukcióknál ez a folyamat az anyaföld hiánya miatt éppen ellenkezőleg történik.

Az éveken át tartó megfigyelések bizonyossá tették, hogy a csapadékhullások következtében a talajréteg felső része nedvesedik csak át. A nedvességtartalom lefelé való növekedését a szél hátráltatja, ugyanis hatása folyamatos párologtatást eredményez, emiatt mélygyökérzetű növények részben kipusztulnak. Extenzív zöldtetőknél ezért is alkalmaznak kisgyökerű vegetációt.

Intenzív és extenzív zöldtetők rendszeres vagy periodikus vezetékes vízzel való ellátása gazdaságilag kontraproduktív. Egyrészt az előbb említett körforgás miatt, másrészt pedig pazarlás az emberi fogyasztásra feldolgozott vizet öntözésre használni. Mesterséges öntözés öntözőberendezéseken keresztül valósulhat meg, amelynek kiépítése nem csekély

költségekkel jár, ehhez járulnak hozzá a karbantartási és esetleges megóvási költségek. Ezért elsődleges cél mindenkor az, hogy lehetőleg természetes úton pótoljuk a hiányzó csapadékmennyiséget.

### **3.3.6.1. Extenzív zöldtetőknél**

Extenzív zöldtetőknél a vegetáció képes „vízhiányos” kényszerhelyzethez alkalmazkodni, azt megakadályozni. Emiatt célszerű a vízellátást kizárólag a természetes csapadékvízzel megoldani mesterséges öntözés általában nem szükséges a vegetáció fenntartásához sem, csupán a készregondozás alatt van rá szükség.

A gyakorlat azt mutatja, hogy az ilyen típusú zöldtetők növényei (varjúháj, kövirózsa, sedum stb.) igen jól bírják a hazai éghajlat szélsőségeit, értve ez alatt főként a nyári szárazságot és forróságot. A sarjvetést követő néhány hétben igényelnek öntözést, de később elegendő a természetes csapadékmennyiség.

Extenzív zöldtetőknél a 6-15, esetleg 20 cm-es talajréteg-vastagsághoz legcélszerűbb 2 cm vastag dombornyomott műanyaglemezt szivárgóréteget beépíteni, ami képes biztosítani a szükséges minimális vízmegtartást. Ezen kívül alternatíva lehet az égetett agyaggolyókból álló ömlesztett szivárgóréteg is, amelyből inkább a tört változat a javasolt, mivel az majd kétszeres mennyiségű vizet képes felszívni porózus felülete miatt.

### **3.3.6.2. Intenzív zöldtetőknél**

Intenzív zöldtetőknél már más a helyzet, ugyanis a növényzet szélesebb körű hasznosítása miatt az alkalmazott növényfajták nem tolerálják a szárazságot, folyamatos és egyenletes vízellátottságot igényelnek így kiegészítő öntözésre általában mindig szükség van. Ezért célszerű mesterséges öntözést ún. automata öntözőrendszert kiépíteni, amely képes az ültetőközegben pótolni az elfolyó, vagy elpárolgó vízmennyiséget. Az ültetőközeg minősége fokozott jelentőségű az intenzív, tehát vastagabb talajréteggel rendelkező zöldtetők esetén, hiszen a lehullott csapadék először a felső réteget nedvesíti át, és ha ez képes a növények számára megtartani ezt a nedvességet, ami így nem szivárog le a felépítmény aljára, akkor ez megtakarítást jelenthet az öntözésre nézve. Az utóbbi időben ez különösen fontos lehet, hiszen a megfigyelhető éghajlatváltozás egyre szélsőségesebb csapadékeloszlással jár, ami azt jelenti, hogy egyre több az intenzív, heves esőzés, amelynek következtében egy csapadékhullási periódusban rengeteg víz folyik át a zöldtető rétegein. Arra kell törekedni tehát, hogy ennek nagy részét vissza tudjuk tartani a növényzet számára.

Intenzív zöldtetők mesterséges öntözésének formái [13]

- Tömlővel
- Tömlővel és szórófejjel
- Porlasztó tömlővel
- Izzadócsővel
- Esőztető automatával/csepegtető öntözés
- Szintszabályzott vízduzzasztással / árasztásos öntözés

**Tömlővel, porlasztó tömlővel vagy izzadócsővel történő öntözés időkapcsolóval is kiegészíthető.**

### **Csepegtetési-öntözés**

Extenzív zöldtetőkön normális esetben nem szükséges a rendszeres öntözés. Extrém időjárási körülmények között azonban ajánlatos néhány menetben fenntartó öntözést végezni. Ez tömlővel vagy mobil berendezéssel is kivitelezhető.

Száraz vidékeken és nagyon csekély rétegvastagság esetén egy csepegtető berendezés a



munkát nagyban megkönnyíti. A vízveszteség csökkentése érdekében a csepegtető csövet a szivárgórétegben, illetve egyrétegű felépítés esetén a szubsztrátban egy műanyag fátyolszövetből készült védőrétegre helyezik. A vízcsap megnyitásakor a csővezeték egész hosszában vizet enged a fátyolszövetre. A víz továbbítása a szövetben a felület lejtésétől függ. A csapot akkor kell elzárni, amikor a lefolyónál víz jelenik meg.

Ez az öntözéstípus az erősen lejtős tetőknél is használható. A csepegtető csövet a tetőgerincnél helyezik el.

A csepegtető módszer is automatizálható. Ehhez szükség van egy nedvességérzékelőre, amely által a talajnedvességet a szubsztrát szívóereje alapján határozhatjuk meg. A szívóerő aktiválja az öntözésvezérlőt, amely vagy a vízvezeték mágnes szelepét nyitja és zárja, vagy a ciszterna szivattyúját kapcsolja ki és be.

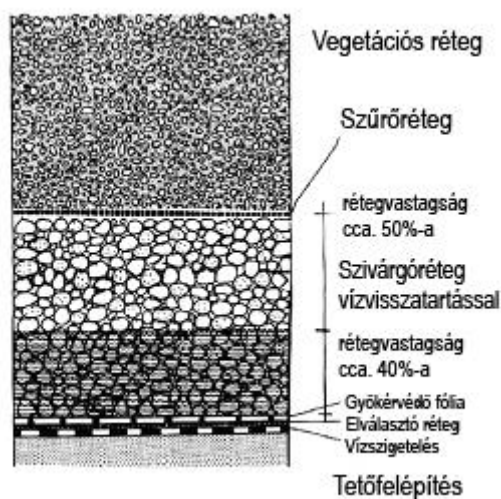
A tisztán ásványi, nagy szemcseméretű szubsztrátoknál az automata csepegtető berendezés nem használható, mert a szubsztrátban lévő üregeken keresztül a nedvességérzékelő nem tud vákuumot képezni.

### Vízduzzasztásos / Árasztásos öntözés

Különböző zöldtetők kivitelezésénél a vízmegtartó képesség vízduzzasztásos kiépítését más és más alkalmazási úton érhetjük el.

Extenzív zöldtetőknél duzzasztásos öntözés növényfiziológiai, azaz a kondicionáló hatások szempontjából nem célravezető.

Egyszerű intenzív tetőknél, vékony talajrétegnél a szivárgórétegben való vízduzzasztás csak akkor értelmes, ha a csapadékszegény periódusokban, mint egy kiegészítő öntözés valósul meg. Intenzív zöldtetőknél a vegetációs rétegben lévő víztartam és a szivárgórétegben lévő felduzzasztott vízmennyiség kombinációja valósul meg, ami tartósan hatékony, valamint ökológiailag és gazdaságilag kedvező vízraktározási forma. (3.6. ábra)



3.6. ábra: Egyszerű intenzív tetők rétegröndje [16]

Természetesen meredek tetőkön nem alkalmazhatók. A berendezést a lejtés nélküli tetőkön a legegyszerűbb beüzemelni. A 2-3%-os, enyhe lejtésű tetőknél kiegészítő küszöbököt kell beiktatni, hogy a vízduzzasztás lépcsőzetesen mehessen végbe.

Az öntözés e típusánál a szivárgórétegben egy permanens „vízduzzasztást” hoznak létre. A duzzasztás egy túlfolyó segítségével történik, amely a tetőn elhelyezett lefolyón keresztül a csatornarendszerbe, jobb esetben egy ciszternába csatlakozik. Az esővíz tehát a drénrétegben a túlfolyó felső szintjéig emelkedhet, a növények gyökerei itt érhetik el a vizet. A drénréteg

legyen nagy szemcseméretű, hogy az alsó vízrétegből a kapillárisokon keresztül ne juthasson víz a vegetációs rétegbe.

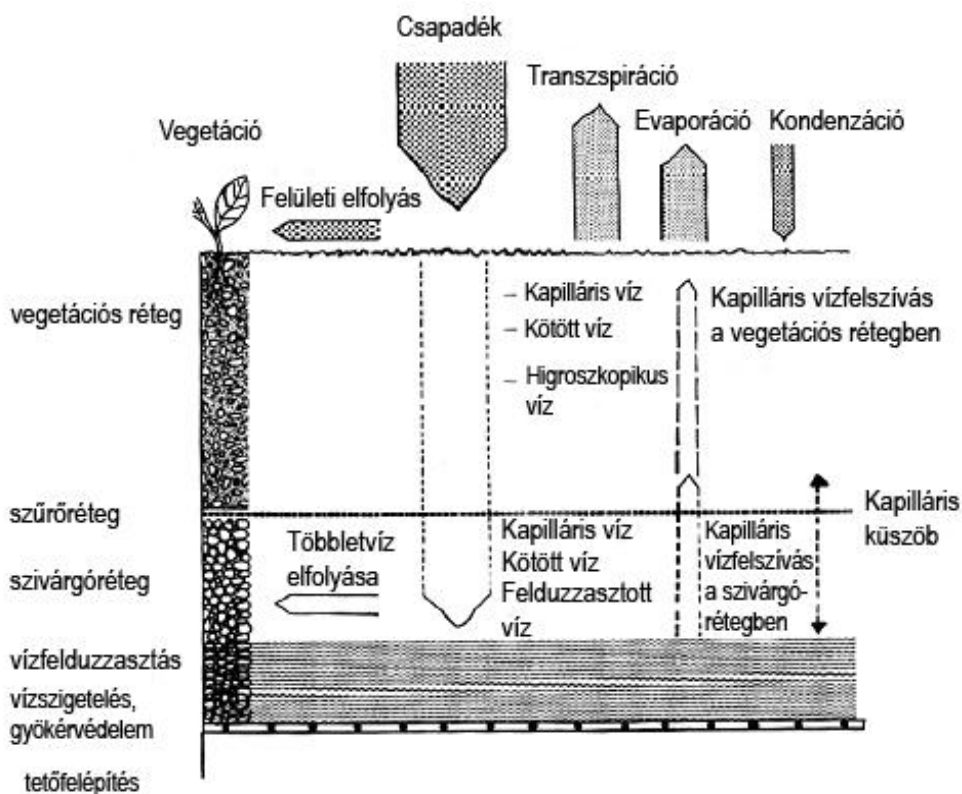
Egy lefedhető doboz elhelyezésével a túlfolyócső ellenőrzése megoldható. A doboz oldalról a drénréteg felé perforált. Annak érdekében, hogy a csapadékvíz eloszlata a doboz és a túlfolyó felé lejtés nélkül megoldható legyen, a drénrétegben csillag formában dréncsöveket kell elhelyezni és bevezetni az ellenőrző dobozba.

Amennyiben szárazság idején a csapadékvíz hiányzik a vízgyűjtőből, fennáll a veszélye annak, hogy a gyökerek kiszáradnak, illetve heves esőzések után a túláradás következtében oxigénhiány alakul ki. Ezért fontos, hogy egy lehetőleg egyenletes vízszintet tudjunk tartani csekély szintingadozással. Ezt vagy a vízvezetékéről, de még jobb, ha a ciszternából történő utántöltéssel oldjuk meg.

Ehhez egy automata öntözőberendezést használnak, amit egy külön ellenőrződobozban helyeznek el, amely szintén dréncsöveken keresztül kapcsolódik a drénréteghez.

Az úszószelep és a túlfolyó ellenőrzésekor arra kell ügyelni, hogy a maximum vízszint mindig alacsonyabb legyen a túlfolyócső magasságánál, különben az automatikus vízutántöltés folyamatosan működésbe lép és ez nagy vízvesztéshez vezet. Az automatikus berendezéseket nyugalmi időszakban (téli) mindig vízteleníteni kell.

**Megjegyzés:** Vízkészletezés vízduzzasztásos módszerrel háromrétegű építési módot feltételez. A legmagasabb vízszint és a szűrőréteg síkja között egy minimális távolságot kell tartani, megakadályozva ezzel az ültetőközeg átnedvesedését. A vízmozgást a **3.7. ábra** szemlélteti.



### 3.7. ábra: Vízmozgás a háromrétegű felépítéses talajnál vízduzzasztással [49]

### 3.3.7. Vízmozgás a talajban

Amennyiben a talaj különböző pontjaiban eltérő a víz potenciális energiája, akkor vízmozgás jön létre és mindaddig tart, amíg az energiakülönbségek ki nem egyenlítődnek. A vízmozgás létrejöhet vízzel telített, tehát kétfázisú talajban, telítetlen, háromfázisú talajban illetve beszélhetünk páramozgásról is [25], [26].

A kétfázisú talaj gravitációs, tehát függőleges irányú vízmozgását elsőként [2] Darcy írta le. Liesecke közölt a témában több egymást követő vizsgálatról cikkekkel [28], [29], [30]. Megállapította, hogy konstans sebességű, egyirányú áramlás esetén, az oszlop alján kifolyt vízmennyiség ( $Q$ ) megadható a következő formában.

$$Q = K_s \frac{A \cdot (l + x) \cdot t}{x},$$

ahol  $Q$  az átfolyt víz mennyisége ( $\text{cm}^3$ ),  $x$  a talajoszlop magassága (cm),  $A$  az oszlop keresztmetszete ( $\text{cm}^2$ ),  $l$  a talajoszlop fölötti vízborítás vastagsága (cm),  $t$  az idő (sec),  $K_s$  az adott rendszerre jellemző arányossági tényező (hidraulikus vezetőképesség vagy szivárgási tényező) (cm/s). A  $K_s$  meghatározása történhet laboratóriumban vagy a helyszínen. Ebből az áramlási sebesség  $v=Q/A$  a következőképpen fejezhető ki.

$$v = K_s \frac{(l + x)}{x}$$

Az  $l+x$  szintkülönbséget leírhatjuk  $H_1-H_2=\Delta H$  formában is, ha  $H_1$  a rendszer legfelső pontja,  $H_2$  pedig a legalsó, illetve  $x$  távolságot felírhatjuk  $z_1-z_2=\Delta z$  értékkel is. Így a telített vízáramlás sebessége általánosan:

$$v = -\left( K_s \frac{\Delta H}{\Delta z} \right),$$

amiből következik, hogy

$$K_s = -\left( v \frac{\Delta z}{\Delta H} \right) = -\left( \frac{Q}{A \cdot t} \cdot \frac{\Delta z}{\Delta H} \right),$$

ahol  $\Delta H$  a hidraulikus nyomáskülönbség (cm),  $\Delta H/\Delta z$  pedig a hidraulikus gradiens (*grad H*), azaz a hidraulikus nyomás egységnyi távolságra eső változása (cm/cm). A negatív előjel a vízmozgás lefelé irányultságát jelzi. Ezt több kutatónál is megtalálhatjuk a vízmozgás számítása során [31], [32], [1].

A háromfázisú talaj vízmozgása a nedvességtenzió-különbségekből adódik, azonban az áramlás csak a vizet tartalmazó, egymással összefüggő pórusokban lehetséges és ez a vízvezető-képesség mindig kisebb, mint a kétfázisú talaj hidraulikus vezetőképessége.

A vízgőz mozgása a pórusterben a harmadik áramlási fajta. Ebben az esetben a vízpárát az áramló talajlevegő sodorja magával, vagy diffúzió révén mozog a parciális nyomáskülönbségek által hajtva [70].

### 3.3.8. A talaj száradása

A talajok száradása a felső talajréteg nedvességtartalmának párolgása (evaporáció) és a vízkészlet növények általi párologtatása (transzspiráció) miatt következhet be. Növényzettel borított területeken úgy, mint a zöldségek esetében is, a két folyamat mindig összefonódik (evapotranszspiráció).

A nedvességtartalom és a nedvességprofil száradás közbeni változását és annak sebességét több tényező befolyásolja.

- a talaj mozgékony vízkészlete és kapilláris vezetőképessége,
- a légmozgás (szél),
- a felszínt érő hősugárzás intenzitása és időtartama, valamint
- a növényzettel való borítottság.

### A talaj levegőgazdálkodása

A talaj pórusterének a nedvesség által el nem foglalt részét levegő tölti ki, azaz  $P_{\text{levegő}} = P_{\text{össz}} - P_{\text{víz}}$ . A talaj levegőtartalma állandóan változik. Átnedvesedéskor a pórusok egy részéből a víz kiszorítja a levegőt, a száradó talajban pedig fokozatosan nő a gázfázis térfogata. A talajlevegő vízgőztartalma nagyobb a légkörinél, relatív páratartalma csak akkor csökken 95% alá, ha a talaj csak kötött vizet tartalmaz [27].

A talaj levegőtartalma igen tág határok között változik. Gyakorlatilag a nullától csaknem 100%-ig. Az egyik legfontosabb jellemző a minimális levegőkapacitás, ami a szabadföldi vízkapacitásig benedvesedett talaj levegőtartalmát jelenti. Ez az érték a három alapvető textúra osztály talajaira vonatkoztatva, a pórustér %-ában kifejezve a következő:

- homok 30-40%,
- vályog 10-25%,
- agyag 5-10%.

## 3.4. A talaj hőgazdálkodása

A kutatási téma szempontjából talán a legfontosabb talajfizikai kérdés a hőgazdálkodás. Az épületre gyakorolt energetikai hatás a talajréteg hőmérsékletétől függ. A talaj hőmérsékletét a beérkező és távozó hő egyensúlya, valamint a talaj hőtani jellemzőit meghatározó tulajdonságok szabják meg.

### 3.4.1. A talaj hőtani jellemzői

A talajok hővel szembeni viselkedését három jellemző alapján lehet értelmezni. Ezek a fajlagos hőkapacitás, a hővezető képesség és a hőmérséklet-vezető képesség.

#### a) Fajlagos hőkapacitás (C)

Azzal a hőmennyiséggel egyenlő, amely egységnyi térfogatú vagy tömegű talaj hőmérsékletét 1°C-kal képes növelni. Mértékegysége  $\frac{\text{J}}{\text{cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}}$  vagy  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$ . A térfogategységre számított fajlagos hőkapacitást (C) az egységnyi tömegre megadott hőkapacitás (fajhő,  $C_m$ ) és a talaj sűrűségének ( $\rho$ ) szorzata adja, azaz  $C = C_m \cdot \rho$ . A szilárd fázist alkotó anyagok hőkapacitásában nincs jelentős különbség, ezért a hőkapacitást elsősorban a víztartalom

befolyásolja. Minél tömörebb és minél nedvesebb a talaj, annál nagyobb a fajlagos hőkapacitása.

### b) Hővezető képesség ( $\lambda$ )

Az a hőmennyiség, ami egységnyi hőmérsékleti gradiens (cm-kénti 1 °C hőmérséklet-különbség) esetén, a talaj egységnyi keresztmetszetű felületén 1 másodperc alatt átáramlik.

Mértékegysége  $\frac{\text{J}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}}$  vagy  $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ .

A talaj gyenge hővezető képessége a szigetelőréteggént funkcionáló laza talajfelszín szélsőséges hőingadozását és a felszín alatti réteg egyenletesen alacsony hőmérsékletét vonja maga után.

A zöldtetők esetén éppen ezt a tulajdonságot szeretnénk kihasználni, miszerint a talajréteg szigetelőként funkcionálhat épületeinken, de mivel értéke nem állandó, bizonyos határok között mozog, ezért további vizsgálatokat igényel pontosítása.

A talajban szállított hőáram sűrűség ( $q$ ) az alábbi összefüggés fejezi ki:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dz},$$

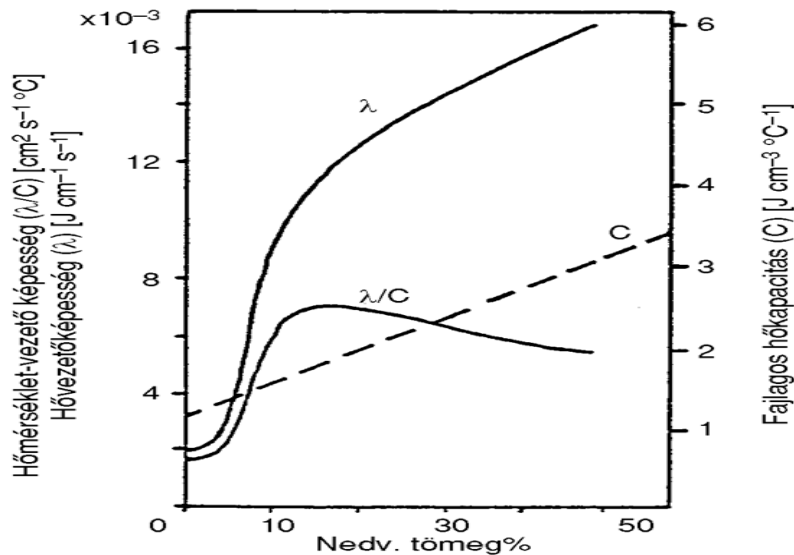
ami analóg a kétfázisú talajban történő vízáramlást leíró Darcy-törvénnyel. A hővezető képesség tehát ugyanolyan arányossági tényező a hővezetésben, mint a vízvezető képesség a Darcy-törvényben.

### c) Hőmérséklet-vezető képesség ( $K_T$ )

Megmutatja, hogy egységnyi hőmérsékleti gradiens hatására időegység alatt hány °C-kal változik meg a talaj hőmérséklete. Mértékegysége  $\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$ , vagy  $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ . Értéke kifejezhető a hővezető képesség (hővezetési tényező,  $\lambda$ ) és a fajlagos hőkapacitás ( $C$ ) hányadosaként.

$$K_T = \frac{\lambda}{C}.$$

A  $K_T$  értéke a talaj felmelegedésre való hajlamát mutatja, és nagymértékben függ a nedvességtartalomtól. A talaj víztartalmának növekedésével egy ideig meredeken emelkedik, majd a maximum elérése után ismét csökken. A legnagyobb hőmérséklet-vezető képessége tehát a közepesen nedves talajnak van. A **3.8. ábra** mutatja a különböző hőtani jellemzőinek változását a nedvesség függvényében.



**3.8. ábra. A talaj fajlagos hőkapacitásának ( $C$ ), hővezető képességének ( $\lambda$ ) és hőmérséklet-vezető képességének ( $KT = \lambda/C$ ) változása a nedvességtartalomtól függően [71]**

Mivel a hővezetési tényező ( $\lambda$ ) mérése körülményes, gyakran a hőmérséklet-vezető képességet ( $KT$ ) határozzák meg. Ebben az esetben a talaj felmelegedését a benne elhelyezett hőforrástól bizonyos távolságban észlelt hőmérsékletváltozásokkal lehet nyomon követni. A  $KT$  értéket a következő összefüggés adja.

$$K_T = \frac{x^2}{2 \cdot t_m},$$

ahol  $x$  a hőforrás és a mérés helyének távolsága (cm),  $t_m$  a hőforrás behelyezésétől a maximális hőmérséklet eléréséig eltelt idő (s). A hővezetési tényező ezután:  $\lambda = K_T \cdot C$ .

### 3.4.2. Hőáramlás a talajban

A talaj termikus egyensúlyát, illetve a talajban lezajló hőtraszport folyamatokat három különféle fizikai jelenség határozza meg. A sugárzás, a hővezetés és a konvekció. A sugárzás meghatározó szerepet játszik a talajfelszín hőforgalmában. A felszínre érkező sugárzás egy része visszaverődik (albedó), más részét pedig elnyeli a talaj (abszorpció). Az elnyelt sugárzás talajok esetében általában 0,5-0,8 között változik. Ez függ a talajfelszín színétől, érdességétől, növényzettel való borítottságától.

A hővezetés a részecskék közvetlen érintkezése által biztosított energiaátadás. Hajtóereje minden esetben a hőmérsékletkülönbség, a hőmérsékleti gradiens kialakulása. Konvekció esetén a hőt az áramló folyadék vagy gáz szállítja. A talajban ez legtöbbször a víz. A folyékony halmazállapotú víz nagy hőkapacitása miatt igen jelentős hőszállító.

### 3.4.3. Hőhártartás és vizsgálata a szakirodalomban

A zöldtető talajrétege energiához juthat a napsugárzásból, a talajba kerülő vízből és az épületből. A csapadékvíz által szállított hő is a napsugárzásból származik, tehát ez nem önálló energiaforrás. A talajban lejátszódó fizikai, kémiai, biológiai folyamatokat is hőfelszabadulás

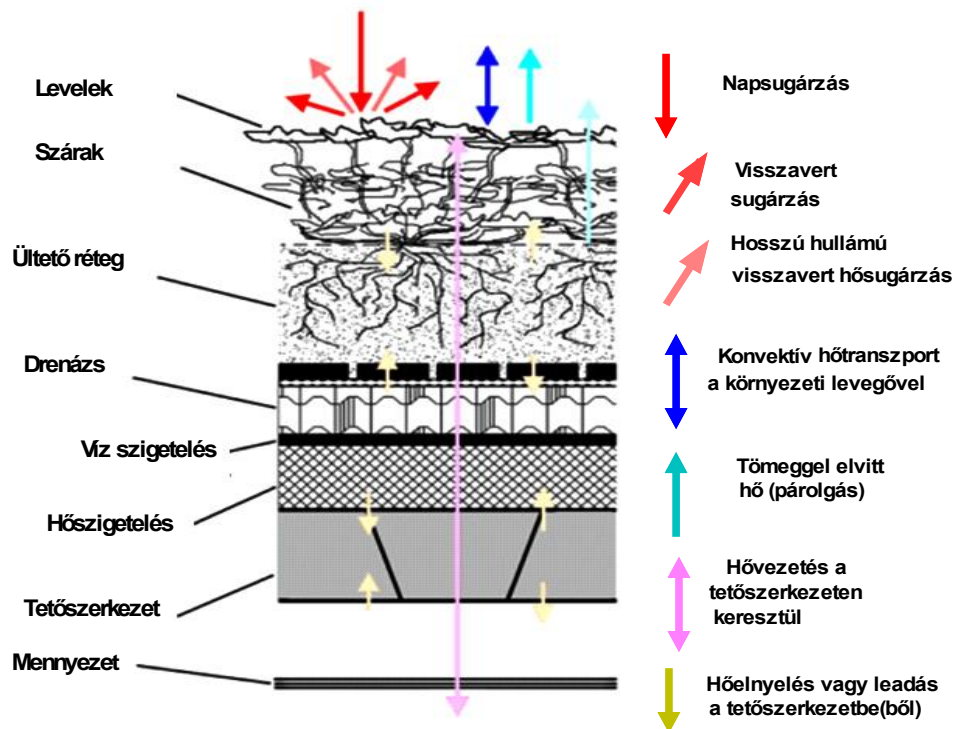
vagy hőelvonás kíséri. A víz párolgása pl. 25°C-on 2500 J/g energiafelhasználással jár. Az evaporáció révén tehát 2500 J/g hőenergia távozik a talajból a légkörbe, ha pedig vízpára kondenzálódik a felszínen, ugyanennyi energia válik szabaddá és kerülhet be a felső rétegbe. Éves periódusban a talaj hőenergia mérlege egyensúlyban van. A Naptól érkező főként rövid hullámhosszúságú sugárzás a talajban nagy hullámhosszúságú sugárzássá, hővé alakul. Ezután kisugárzással és párologtatással adja le a hőt a talaj.

A talajhőmérséklet napi és éves menete megközelítőleg szinusz függvénnyel írható le. Minél vastagabb a talajréteg a tetőn, annál kisebb a hőingadozás mértéke.

A laza szerkezetű, sok levegőt tartalmazó talaj felszíne, mivel a levegő hőkapacitása kicsi, gyorsan felmelegszik. A levegő azonban kis hővezetése miatt gátolja az alsóbb rétegek gyors felmelegedését vagy lehülését.

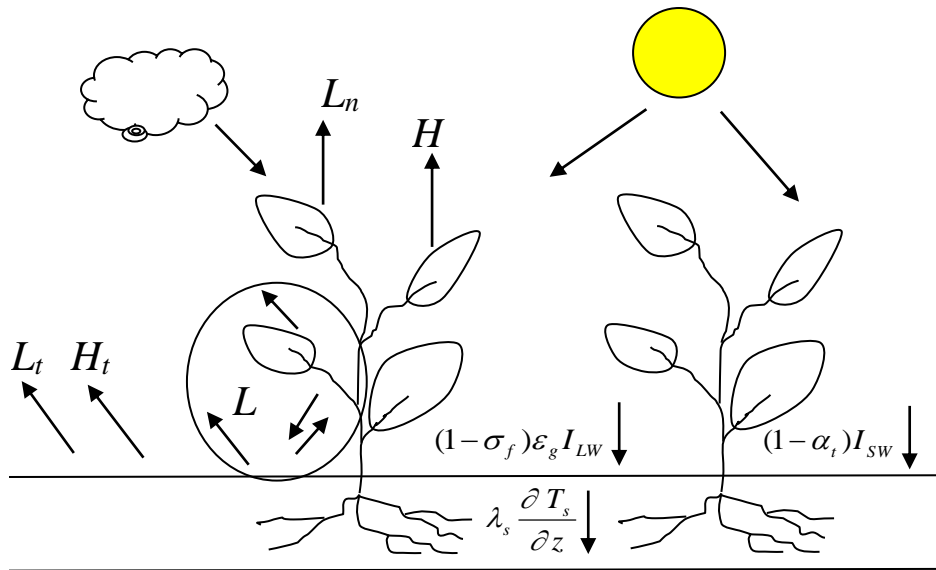
A tömör és nedves talajok felszínén viszonylag kicsi a hőingadozás. A talaj felmelegedése elsősorban a nedvességtartalmától és a párolgás intenzitásától függ.

A zöld tető, de általában az épületszerkezetek hőmérsékletét a környező, kapcsolódó környezet és tárgyak határozzák meg. A környezetből nyert vagy annak leadott hőenergia többféle módon juthat be vagy el a tetőszerkezetbe vagy abból el. A zöld tető egy szeletének hőtraszportját a **3.9 ábra** mutatja. Dolgozatomban főként a hővezetéssel foglalkozom, de itt felsorolom az egyéb hőtraszport lehetőségeket is.



**3.9. ábra** A zöld tető lehetséges hőtraszportja

A tetőszerkezetek és a környezet közötti hőtraszport egy jelentős része sugárzás útján jön létre. Amint az a tradicionális tetőszerkezetek esetében is jól ismert, a növényi borítottsággal rendelkező tetőszerkezetek energiaegyensúlyát is a beeső napsugárzás befolyásolja alapvetően. Ezt a napsugárzást egyenlíti ki egyrészt a hagyományos konvekciós és a látns (evaporatív) hőfluxus energia elvonó hatása a növényzet és a talaj felszínéről, valamint további energia távozik hővezetéssel a talajba, illetve hosszuhullámú (termikus) sugárzás által a növényi és talajfelület szintén energiát ad le [7], [19]. A **3.10. ábra** mutatja a különböző energiaáramlási irányokat. (Az ábra jelöléseire külön magyarázatot nem fűzök.)



3.10. ábra Energia egyensúly a zöldtetőn

### A hőszugárzás alaptörvényeinek rövid áttekintése

Minden test a felületi hőmérsékletétől és a felület minőségétől függő intenzitású és hullámhosszúságú sugárzást bocsát ki. A kisugárzott energia mennyisége a sugárzást kibocsátó test (abszolút skálán mért) felületi hőmérsékletének negyedik hatványával és a felület minőségétől függő emissziós tényezővel arányos. Ez a Stefan-Boltzmann törvény

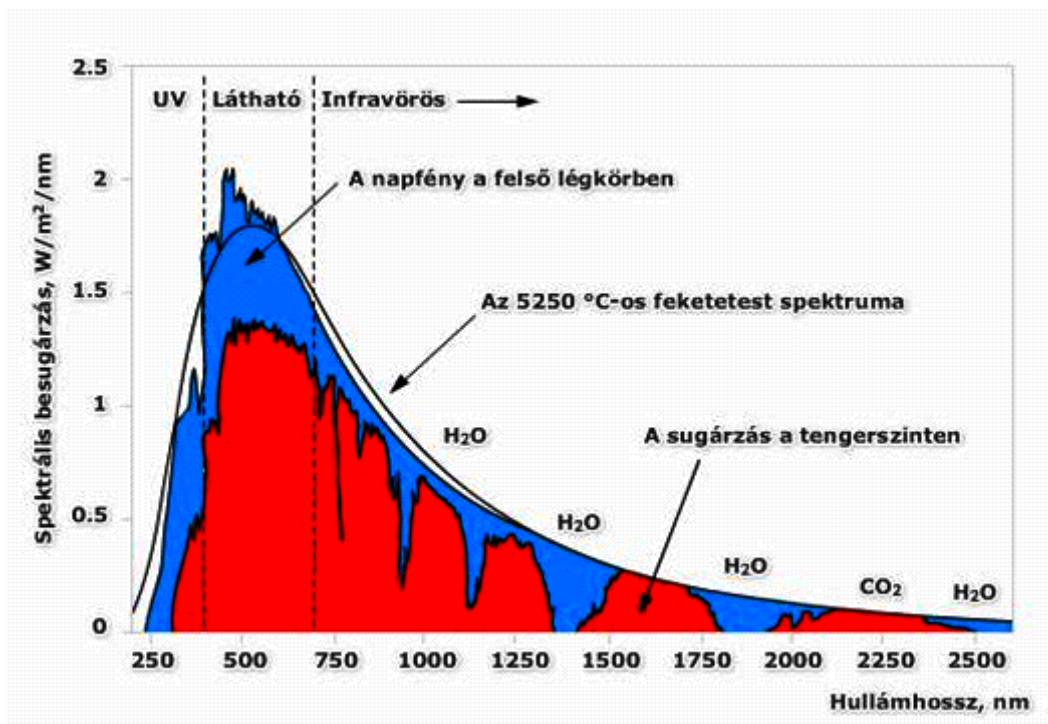
$$\dot{q} = \sigma \cdot T^4$$

ahol  $\dot{q}$  a teljes fajlagos kisugárzás vagy emittancia, vagyis a feketetest által egységnyi idő alatt, egységnyi felületen, valamennyi hullámhosszon kisugárzott energia.  $T$  az abszolút hőmérséklet, és  $\sigma$  a **Stefan-Boltzmann-állandó** [75], melynek értéke:

$$\sigma = 5,672 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

A kisugárzott energiának egy bizonyos hullámhosszon maximuma van (ld. **3.11. ábra**). A maximumhoz tartozó  $\lambda_m$  hullámhossz és a felületi hőmérséklet közötti összefüggést a Wien törvény határozza meg, amely szerint úgynevezett „színképe”, spektrális eloszlása van a kisugárzott energiának. Ami a felületi hőmérsékleteket illeti, a továbbiakban két esetnek van jelentősége. Az egyik a napsugárzás. A Nap felületi hőmérséklete 6000 K. A másik a "földi felszínnek" (terep, tető, határoló szerkezet) sugárzása, ezek felületi hőmérséklete a 250-350K tartományba esik.





**3.11. ábra A Földre érkező sugárzás energiatartalmának változása a hullámhossz függvényében [87]**

A napsugárzás spektrális eloszlása a világűrben az ábra felső görbéje szerinti, mire azonban a földi felszínre eléri, az alsó görbe szerinti alakot veszi fel. A földfelszínre érkező sugárzás spektruma nagy vonalakban ugyan hasonlít még az ideális fekete test elméleti ideális sugárzási görbéjéhez, de a légkör jelentősen torzítja. Figyeljük meg légkörben lévő egyes anyagok (por, vízgőz, szennyezések) energiacsökkentő hatásait.

A **3.11. ábra** szerinti spektrumban három intervallumot különböztethetünk meg. Az első az ultraibolya sugárzásé. Ennek élettani szerepe igen fontos, egyes anyagok, felületképzések öregedése miatt állagvédelmi szempontból ugyancsak jelentős, energetikai szerepe elhanyagolható. A második a látható fényé, ebben az intervallumban érik a sugárzási energiának majdnem a fele. A látható fény intervalluma az ibolyától a vörösig terjed. A harmadik intervallum a - hosszú hullámhosszú - infravörös sugárzásé – ebben az intervallumban a sugárzási energiának valamivel több, mint a fele érkezik.

A test felületére érkező sugárzás általában három részre oszlik:

- a felület az energia egy részét elnyeli, az elnyelt hányad nagyságát az "a" elnyelési (abszorpció) tényező jellemzi,
- a felület a sugárzás egy részét visszaveri, a visszavert hányadot az "r" visszaverési (tükrözési, reflexió) tényező jellemzi,
- a felület és a mögöttes anyag a sugárzás egy részét áttereszti, az átteresztett hányadot a "t" átteresztési (transzmittálási) tényező jellemzi.

Az elnyelt, visszavert és átteresztett energia összeg megegyezik a felületre jutó energiával, azaz  $a + r + t = 1$ .

Ha mindhárom tényező zérusnál nagyobb, akkor a test átteresztő (transzparens).

Ha az átteresztési tényező  $t = 0$ , a test nem átteresztő (opak).

Ha  $a = 1$ ,  $r = t = 0$ , akkor abszolút fekete testről beszélünk, amely a ráeső sugárzást teljes egészében elnyeli.

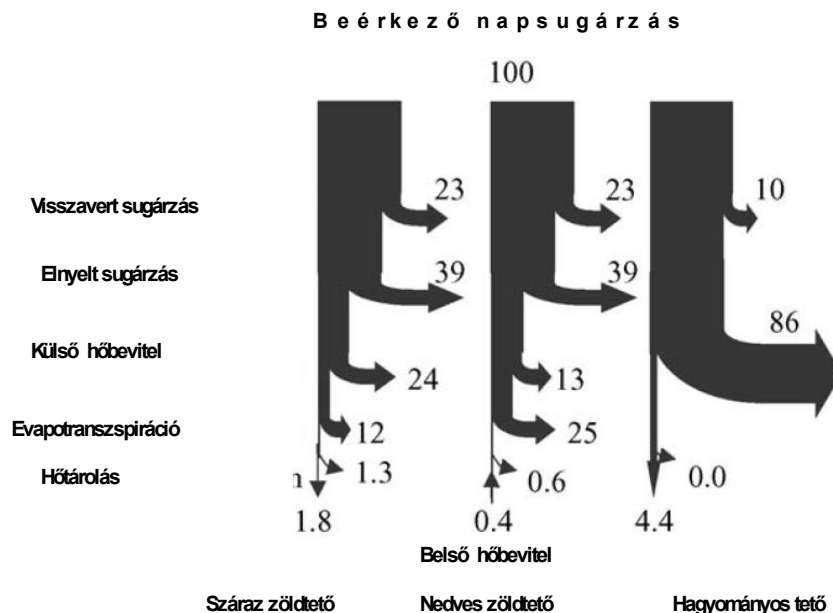
Az átteresztési, elnyelési és visszaverési tényezőkkel kapcsolatban mindig meg kell adnunk azt is, hogy milyen hullámhossz tartományú, milyen spektrumú sugárzásra vonatkoznak. Így

beszélhetünk a napsugárzásra vonatkozó elnyelési tényezőről, de a földi felszínek sugárzására (az úgynevezett "alacsonyhőmérsékleti sugárzásra") vonatkozóról is.

### Zöldtetők esetében a többen vizsgálták ezeket a tényezőket.

Lazzarin professzor kutatócsoportjának [50] téli (2004 február és március) és nyári (2003 június és július) vizsgálatai számos fontos megállapítással szolgálnak a zöldtetők alkalmazásával kapcsolatban. Összehasonlították a hagyományos és zöldtetők termikus fluxusának alakulását a téli és nyári környezetben, illetve a nyári időszakban száraz és nedves időjárási körülmények között is. A **3.12. ábra** mutatja be a hagyományos és a zöldtető szerkezetének hatását 100 egységnyi beeső napsugárzásra a nyári vizsgálati időszakban.

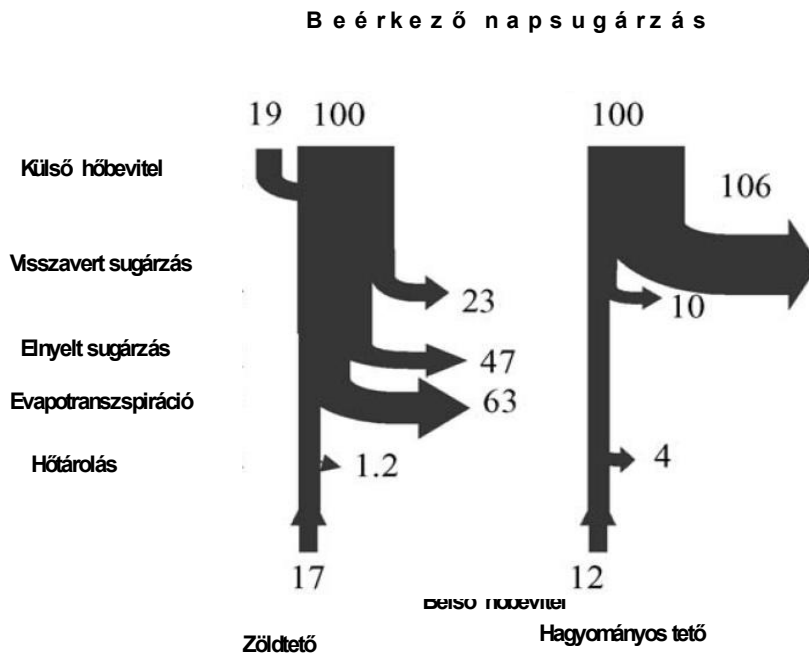
A hagyományos tetőszerkezet albedója 10%-os, amíg a zöldtető reflexivitása a növényzet levélzetének hatása miatt 23%-os a nedvességi viszonyoktól függetlenül. A következő a napsugárzást csillapító hatás a zöldnövényzet elnyelő hatása. Ez a nedvesség viszonyoktól függetlenül 39%-os nagyságúnak adódott a mérések során. Enélkül a hatás nélkül a hagyományos tetők hőmérséklete elérheti akár a 70 °C-t is. Ez a magyarázata annak, hogy a hagyományos tető a mérések során a beeső napsugárzás által hordozott energia közel 85.6%-t nyelte el. Ennek folyományaként a hagyományos tetőszerkezet alatti térrészbe a beeső sugárzás által hordozott energia 4.4 %-a jutott, ami az épület belső helységeinek melegedését okozza. Ha összehasonlítjuk ezt az eredményt a zöldtetők nedves és száraz viszonyok között mért, a tetőszerkezet alatti lakótérbe jutó termikus fluxusával akkor látható, hogy a zöldtetők hatékonyabban védik az épület belső tereit az esetleges túlmelegedéstől. Ez különösen igaz a nedves zöldtetőre, ahol a mérésekből kapott eredmények alapján látható, hogy a tető alatti épületrészbe beáramló termikus fluxus megszűnik, sőt onnan ellenkező irányban fellépő termikus fluxus ébred, azaz a tetőszerkezet alatti lakótér hűlni fog, ami a nyári időjárási viszonyok között előnyösnek tekinthető.



**3.12. ábra.** Nyári mérés eredményei Lazzarin [50]

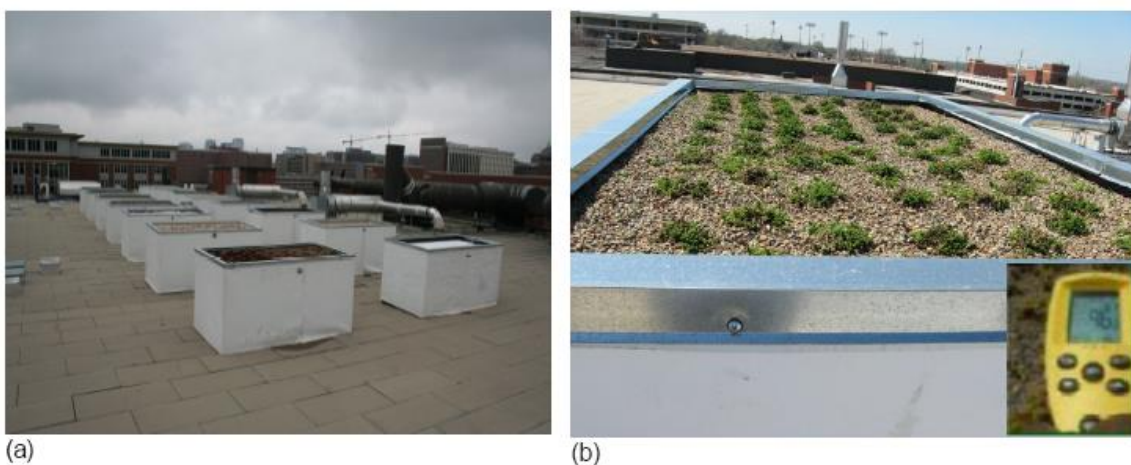
A téli mérési eredmények összehasonlítása a **3.13. ábrán** látható. Ebből az összehasonlító ábrából pedig az a következtetés vonható le, hogy a hagyományos szigetelt tetőszerkezet a téli

időjárási viszonyok között jobban teljesít. Ez jelen helyzetben azt jelenti, hogy a hagyományos tetőszerkezet jobban védi az épületet a téli kihűléstől. Ez abból látható, hogy a temperált térrészből kiáramló termikus energia fluxus csak 12%-os a hagyományos, míg a zöldtető esetén 17 %-os mértékű, a beeső napsugárzásból származó beérkező energia mennyisére viszonyítva.



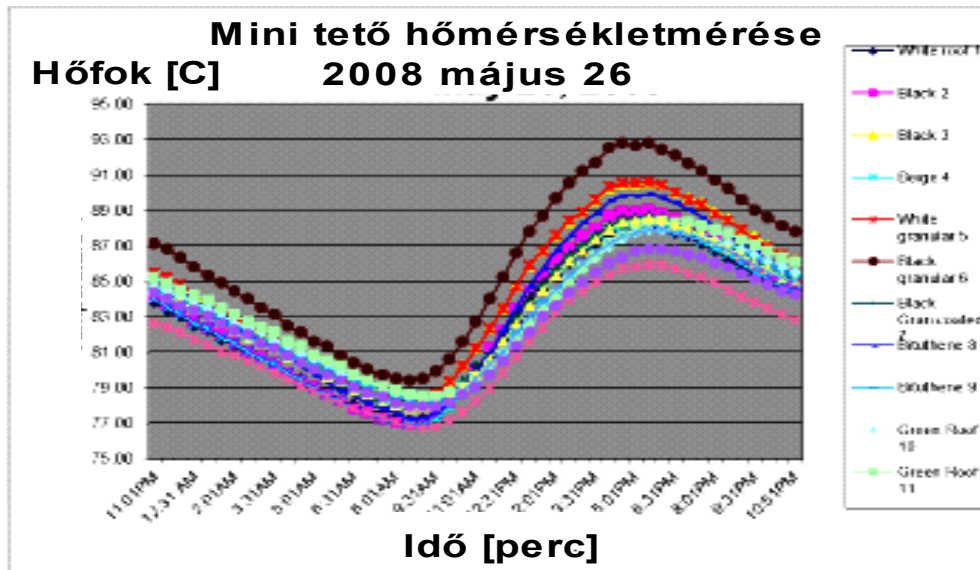
3.13. ábra Téli mérés eredményei Lazzarin [50]

[61] Robert W. Peters, Ronald D. Sherrod és Matt Winslett kutatók 15 mini-tető makettet készítettek (ld. 3.14. ábra) és ezeken a tetőmodelleken végzett méréseiket összegezték cikkükben. A különböző struktúrájú tetőszerkezeteket állítottak össze a mini-tetők felszín alatti hőmérsékletét rendszeresen mérték infra hőmérővel. A teljesség igénye nélkül közlök néhányat az általuk mért hőmérséklet-görbékből.



3.14. ábra a./ A mini-tető modellek b./ a zöld mini-tető modell [61]

A **3.15. ábrán** az általuk mért néhány tetőfajta hőmérséklet-lefutását láthatjuk. A barna mérések teljesen fekete bitumen tetőt mutatnak (legfelső görbe). A legalsó görbe a fehér tetőt mutatja a világoskék görbe pedig a zöldtető hőmérséklet lefutását mutatja.



**3.15. ábra** A mini-tetők hőmérséklet-lefutása egy napon [61]

Néhány fontos megállapítást idézek a végső konklúziókból. A különböző tetőfedő anyagok befolyásolják az energia felhasználást, a fűtést, szellőzést és légkondicionálást. A fekete tető eredményezte a legmagasabb hőmérsékletet. Fekete tetőfedő anyagok és bitumen, kátránypapír tetők eredményezik a legmagasabb fűtési és hűtési költséget.

A tiszta fehér tetők felmelegedés a legkisebb, a többi tetőfedő anyaggal összehasonlítva. Idővel azonban, a fényvisszaverő (fehér) tetők elpiszkolódnak és veszítenek képességükből, így ezek a tetők is kevésbé energiahatékonyak. A zöld tető (növényzet) tetők elég hatékonyak energiafelhasználás szempontjából. A zöldtetők eredményezett hőmérséklete tipikusan 1,1-1,7°C magasabb, mint a fehér tetőké. A zöld tető azonban visszatartja a csapadékvizet, csökkenti vihar alkalmával a gyors csapadék lefolyást, csökkentve a csatornahálózat terhelését.

A "fehér" és a "zöld" tető jelentősen csökkentik a tetők felületi hőmérsékletét, és ezáltal a (város) levegő hőmérsékletét is. A különböző tetők, szignifikánsan eltérő átlagos középértéket produkálnak, de ez többnyire csak a nyári hónapokra jellemző. Az év többi részében, a tetők hőmérsékleti viselkedése hasonló egymáshoz.

Dolgozatomban főként a tetőszerkezetben (melybe a talaj és a növényzet is beleértendő) lejátszódó hővezetési problémával kívánok részletesebben foglalkozni. A hőszigetelésből és a környező levegővel történő hőcserével érkező vagy távozó hőfluxust a mérésekből vett felszíni hőmérsékleti adatokkal veszem figyelembe. Így elsősorban a tetőszerkezetben lejátszódó hőtranszport folyamatokat mutatom be.

Jim és Tsang [59] cikkében kidolgozta a különféle nem biológiai jellegű rétegek hőtranszport viszonyainak leírására szolgáló matematikai modelleket. Ezek a rétegek a talaj, a szigetelési (közetgyapot), és a szivárgási rétegek voltak.

A talaj hőtranszportjának matematikai modellje.

$$\rho c_p \frac{\partial T_s(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_s \frac{\partial T_s(x,t)}{\partial z} \right)$$

ahol,  $T_s$  a talaj hőmérséklet függvénye,  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda_s$  a talaj-víz-levegő keverék sűrűsége, fajhője és hővezetési tényezője.

Mivel a hőtranszport a talajokban erősen függ a talaj nedvességtartalmától a hővezetési tényező állandónak való feltételezése nem tekinthető realisztikusnak.

Amint az megszokott az energia egyensúly más összetevőinél is, az épületszerkezetek egyszerűsített matematikai modellezésénél, így a hővezetési tényezőnél és a fajhőnél is feltételezhetjük, hogy a horizontális változása elhanyagolható ezeknek a paramétereknek, azaz állandónak feltételezhetjük egy-egy kellőképpen vékonynak tekinthető magassági rétegben. A hagyományos épületszerkezeti elemek termikus paramétereit nagy pontossággal állandónak tekinthetjük, azt külső paraméterek nem befolyásolják számottevően. Viszont az épületek tetején elhelyezett ültetőközeg, talaj hővezetési tényezőjének és fajhőjének esetleges vertikális változása nem mindig tekinthető elhanyagolhatónak, mivel azt erősen befolyásolja a talaj nedvességtartalma [7]. A nedvességtartalom pedig jelentősen azaz nem elhanyagolható mértékben változik főként az időjárás függvényében az ültetőközegben. Általánosságban elfogadható az a mérésekkel is igazolt eredmény, hogy a talaj hővezetési tényezője és fajhője lineárisan változik (növekszik) a talajnedvesség tartalmának függvényében, a nedvességtartalom növekedésével párhuzamosan. Általánosságban elfogadható továbbá az a szabályszerűség is, hogy a nedvességgel teljesen telítettnek tekinthető talajok fajhője 40%-al, a hővezetési tényezője pedig kétszer nagyobb, mint ugyanakkor a talajnak a teljesen száraz állapotában mért fajhője és hővezetési tényezője [7].

A nedvességtartalommal nem csak az ültetőközeg termikus tulajdonságai változnak, hanem a talaj elektromágneses sugárzást visszaverő (reflektáló) képessége is, amit albedónak neveznek. A nedvességtartalom növelésével csökken az ültetőközeg albedója, ami nyári időjárási körülmények között nem tekinthető előnyös jelenségnek, mivel csökkenti az ültetőközeg sugárzást visszaverő képességét, ami a lakókörnyezet túlmelegedését fokozza. Az albedó értékét százalékos formában szokás megadni, ahol a 100%-os albedót tökéletesen visszaverő testnek a 0%-os albedót pedig abszolút fekete testnek lehet tekinteni. A talajok albedója általában a nedvesség tartalom növekedésével 0.08-as azaz 8% körüli értékig csökken, amely változás a nedvesség tartalom függvényében szintén jó közelítéssel lineárisnak tekinthető.

A zöld tetők különböző vizsgálatiról [60] a 2015-ben megjelent könyvben találunk igen jó összefoglalást.

### 3.5. A talaj hőtechnikai jellemzőinek vizsgálata

A talaj (pedoszféra) a földkéreg legfelső, laza, termékeny, a növények termőhelyéül szolgáló rétege. Talajtakaró csak ott képződik, ahol a földkéreg szilárd felszíne, a légkör és a víz érintkezik egymással. A talaj összetevői a *talajváz*, amely a kőzetek aprózódásával jön létre (pl. agyag, homok, lösz stb.), a *humusz*, olyan szerves anyag, amely az elpusztult élőlények bomlásterméke, továbbá a *talajnedvesség* és *talajlevegő*. A talajnedvesség hatását vizsgálták a hővezetési tényező alakulására a [41] cikkek szerzői.

A talaj, mint különféle összetevők keverékének hőtechnikai viselkedése, amely nagymértékben függ az alkotórészek arányától, illetve ennek időbeli változásától.

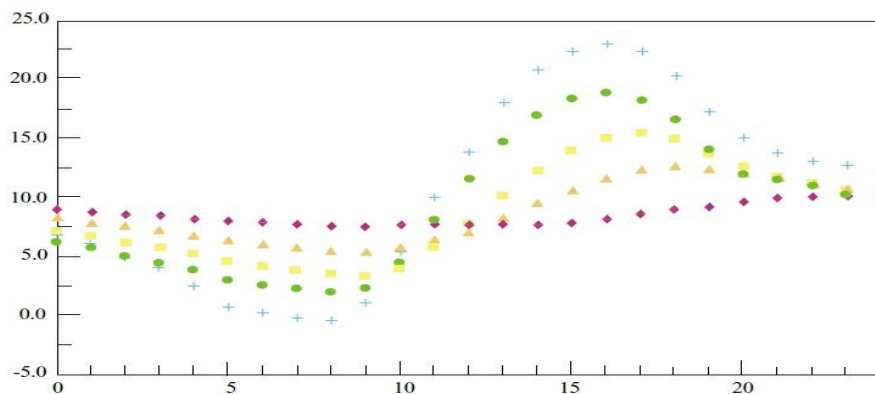
Megvizsgáljuk, hogy milyen hőtechnikai folyamatok játszódnak le a talaj felső, sekély rétegeiben, amelyeknek a motorja a napsugárzásból származó hőenergia. A talaj összetevői közül a víz és a levegőtartalom mértéke változik időben a leggyakrabban, ezért a napsugárzással összefüggő periodikus változás is ezekre van rövidtávon hatással.

Sorra vesszük a talaj hőtechnikai jellemzőit, majd a továbbiakban különböző módszereket tekintünk át a talaj hővezetésének mérésére és számítására, amely az összetétel időbeli folyamatos változása miatt meglehetősen összetett. Azonban elengedhetetlen, hogy rendelkezünk olyan számítási módszerekkel, amelyek pontos eredményekhez vezetnek, ahhoz hogy képesek legyünk leírni a talaj hőtechnikai folyamatait.

### 3.5.1. Hővezetési tényező számítása, mérése

Éves periódusban a talaj hőenergia mérlege egyensúlyban van. A Naptól érkező főként rövid hullámhosszúságú sugárzás a talajban nagy hullámhosszúságú sugárzássá, hővé alakul. Ezután kisugárzással és párologtatással adja le a hőt a talaj.

A talajhőmérséklet napi és éves menete megközelítőleg szinusz függvénnyel írható le. A laza szerkezetű, sok levegőt tartalmazó talaj felszíne, mivel a levegő hőkapacitása kicsi, gyorsan felmelegszik. A levegő azonban kis hővezetése miatt gátolja az alsóbb rétegek gyors felmelegedését vagy lehűlését. (3.16. ábra). A tömör és nedves talajok felszínén viszonylag kicsi a hőingadozás. A talaj felmelegedése elsősorban a nedvességtartalmától és a párologás intenzitásától függ.



3.16. ábra Óránkénti levegő hőmérséklet (+), és talaj hőmérséklet 1 cm (●), 5 cm (■), 10 cm (▲) és 20 cm (◆) mélyen egy nap során. [77]

A számításainkban az egyik legfontosabb paraméter a talaj hővezető képességének meghatározása volt. A következőkben ismertetem a különböző módszereket a talaj hővezető képességének mérésére illetve számítására [77] számú irodalom alapján.

#### 1. Módszer

A talaj hővezetésének meghatározása történhet oly módon, hogy mérjük a hő eloszlást állandó hő bevitel mellett egy pontszerű vagy vonalszerű hőforrás segítségével. [76] internetes oldal bemutatja a ELGI ún. needle probe elven működő műszert, amely a talajba helyezett tűszerű szonda melegedését és hűlését méri és ebből határozza meg a talaj vagy laza közet hővezetési tényezőjét. Ebben az esetben a talaj felmelegedését a benne elhelyezett hőforrástól bizonyos távolságban észlelt hőmérsékletváltozásokkal lehet nyomon követni. Az  $\alpha$  hődiffúziós tényező



értékét a következő összefüggés adja.

$$\alpha = \frac{x^2}{2 \cdot t_m} \left[ \frac{m^2}{s} \right], \quad 3.1$$

ahol  $x$  a hőforrás és a mérés helyének távolsága (cm),  $t_m$  a hőforrás behelyezésétől a maximális hőmérséklet eléréséig eltelt idő (s). A hővezetési tényező ezután:  $\lambda = \alpha \cdot C_v$ .

Ahol  $C_v$  a talaj hőkapacitása egységnyi térfogatra számítva.

## 2. Módszer

A de Vries-modell a következő feltevésen alapszik. A talajt, mint három összetevő keverékét kezeli. Levegő, víz és szilárd részecskék halmaza. A talaj hővezetését az összetevők hővezetéseinek súlyozott átlagaként számítja ki. A víztartalmat nem csak folyékony vízként veszi figyelembe, hanem vízgőz formájában is. A levegő-vízgőz keverék hővezetési tényezőjét egyszerűen a két komponens hővezetési tényezőinek összegeként számolja. A víz, a száraz levegő és a kvarc hővezetési tényezője 20°C-on 0,58, 0,024 és 6,15-11,3 W/mK értékű, ezért a víz és levegőtartalom függvényében nagy eltérések lehetségesek az átlagértékekben.

## 3. Módszer

Az ún. nulla-illesztés módszere abból áll, hogy a nedvességtartalmat és a hőmérsékletet kis időközönként mérjük különböző mélységi pontokon. Kezdeti feltételként egy referencia szinten megbecsüljük a hővezetést. Ezen a referencia mélységi ponton a hővezetési tényező értéke a következő ( $i=r$  mélységben).

$$\lambda_i = \frac{\dot{q}_i}{\left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_i}. \quad 3.2$$

A talaj hőáramsűrűsége,  $\dot{q}_i \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ , a referencia szint fölötti minden pontra a következő kifejezésből adódik:

$$\dot{q}(z) = \dot{q}(z_r) - \int_{z_r}^z \left( C_v \frac{\partial T}{\partial t} \right) dz, \quad 3.3$$

ahol  $C_v$  a fajlagos térfogati hőkapacitás. A nulla-illesztés módszerében a talaj hővezetését az ún. kalorimetriás módszerrel és a hőmérséklet gradiens módszerével számoljuk, még hozzá oly módon, hogy a számítást azon a ponton kezdjük, ahol zéró hőmérséklet gradiens fordul elő.

## 4. Módszer

A Laplace transzformáció módszere, amely integrálja a Laplace transzformációt a talaj hővezetésének egyenletével.

$$\alpha \cdot \frac{d^2 L[T(z, t)]}{dz^2} = T(z, 0) + s \cdot L[T(z, t)]. \quad 3.4$$

ahol a Laplace transzformáció a következőből adódik:

$$L[T(z, t)] = \int_0^{\infty} T(z, t) \exp(-st) dt \quad 3.5$$

ahol  $s \geq 5.0/t_{\max}$  a Laplace paraméter,  $t_{\max}$  pedig a kísérlet leghosszabb időtartama.

A transzformációt arra használjuk, hogy a talaj hődiffúzióját ( $\alpha$ ) megállapítsuk, miközben a hőkapacitást mérjük, vagy számítjuk. A hővezetési tényezőt pedig a fajlagos térfogati hőkapacitás ( $C_v$ ) és a hődiffúziós tényező szorzataként kapjuk meg.

$$\lambda = \alpha \cdot C_v. \quad 3.6$$

## 5. Módszer

A statisztikus-fizikai modell a hőellenállás összefüggésein (Ohm-törvény, Fourier-törvény), a Kirchhoff-törvényeken és a polinomiális eloszláson alapszik. A talajtérfogát egysége a modell szerint szilárd részecskékből valamint víz és levegő részecskékből áll. Úgy kezeljük, mint egy elemi részecskékből álló rendszert, ebben az esetben gömbök, amelyek egymáson fekvő rétegeket képeznek. Feltételezzük, hogy a rétegek, illetve az egyes részecskék közötti kapcsolat megfelel egy sorosan illetve párhuzamosan kapcsolt hőellenállások rendszerének. A rendszer eredő ellenállását összehasonlítjuk az egységnyi térfogatú talajminta összes lehetséges részecske kombinációjából adódó hőellenállással, és így lehetőségünk van megbecsülni a talaj hővezetési tényezőjét.

## 6. Módszer

Numerikus módszer az egy dimenziós hővezetés egyenletének a megoldásán alapszik. Ez esetben a hődiffúziós együtthatót konstansnak feltételezzük, hogy a fajlagos térfogati hőkapacitást az alábbi egyenletből számoljuk, így megkaphatjuk a hővezetési tényezőt a 3.6 egyenletből.

$$C_v = (c_s + 4,19 \cdot 10^3 \cdot \theta_w) \cdot \rho, \quad 3.7$$

ahol  $c_s$  a szilárd talajrészecskék fajhője (753 J/kgK),  $\theta_w$  a talaj víztartalma (kg/kg),  $\rho$  pedig a talaj sűrűsége (kg/m<sup>3</sup>). [69]

## Konklúzió

A szakirodalomban fellelhető fenti módszerek mindegyike jól használható a talaj hővezetésének megállapítására, feltéve, ha nincsenek magas hőmérséklet gradiensek és elhanyagoljuk a talaj páratartalmának hatását a hővezetésre. Ezek fennállása esetén a statisztikus-fizikai modell vagy a de Vries-módszer [77] használható megbízhatóan, de ez utóbbi különös körülményt igényel, főleg a súly értékek számításánál.

Az alábbi **3.5. táblázatban** megfigyelhetjük az egyes módszerekkel ugyanazokra a



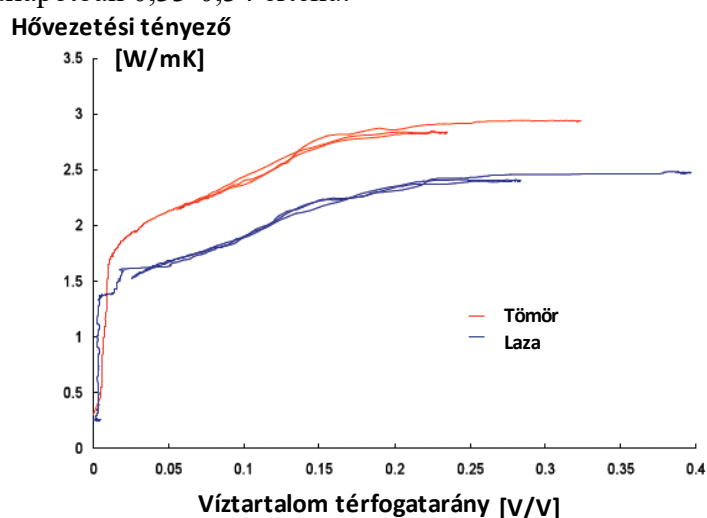
körülményekre számított hővezetési tényező értékeinek alakulását.

### 3.5. táblázat Hővezetési tényezők számított értékei a fenti módszerekkel, 2# - de Vries modell páratartalommal, 5# - statisztikai-fizikai modell páratartalommal [77]

Átlagos léghőmérséklet	Nedvesség tartalom	Fajlagos térfogati hőkapacitás	Hővezetési tényező (W/mK)						
			Módszerek						
(°C)	(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	(MJ/m <sup>3</sup> K)	1	2	2#	3	4	5	5#
25.2	0.259	2.34	1.13	1.21	1.55	1.13	1.04	1.15	1.17
32.3	0.282	2.43	1.20	1.34	1.63	0.96	1.09	1.17	1.19
26.9	0.276	2.40	1.18	1.34	1.59	1.13	1.14	1.17	1.19

#### 3.5.2. A mérési módszerek

A cikk szerzői 4 féle szemcseméretű homokot használtak, hogy méréssel határozzák meg a hővezetési tényezőt a víztartalom függvényében. A homokfajtákat a mértékadó szítaméretekkkel adták meg, amelyek a következők. #12/20, #20/30, #30/40 és #40/50. A porozitásuk tömör állapotban 0,33-0,34 értékű.



3.17. ábra Hővezetési tényező a víztartalom függvényében a #20/30 számú homokmintához tömör és laza állapotban

A kísérlethez a #20/30 számú homokfajtát használták, amelynek a mértékadó szemcsemérete 0,75 mm, az anyagsűrűsége 2,65 g/cm<sup>3</sup>. Két tömörségi állapotban vizsgálták az anyagot. A tömör állapot szárazon vett halmazsűrűsége 1,8 g/cm<sup>3</sup>, laza állapotban ugyanez az érték 1,62 g/cm<sup>3</sup>. A porozitás értékek ugyanezekhez 0,322 és 0,388 (3.14. ábra).

A mérést egy ún. **Tempe cella** [73] (Model no. CI-029B, Soil Measurement Systems LLC) elnevezésű berendezéssel végezték, amely eredetileg talajok víztartalom mérésére szolgál (3.18. ábra). Ezt úgy módosították, hogy különböző érzékelőket helyeztek a belsejébe, amelyek mérték a talajminta víztartalmát, kapilláris nyomását, hőmérsékletét és hőtani tulajdonságait. Ez utóbbit egy KD-2 Pro elnevezésű érzékelővel oldották meg, amely két tűt tartalmaz és képes a hőterjedés mérésére.



**3.18. ábra** Tempe cella szétszedett (felső kép) és összerakott (alsó kép) állapotban

### 3.5.3. A számítási módszerek

#### *Számítás no.1*

Johansen (1975) [77] a következő félempirikus összefüggést használta a száraz hővezetési tényező számítására.

$$\lambda_{\text{száraz}} = \frac{0.135\rho_b + 64.7}{\rho_s - 0.947\rho_b}, \quad 3.7$$

ahol  $\rho_b$  a talaj halmazsűrűsége ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\rho_s$  pedig a talajszemcsék anyagsűrűsége ( $\text{kg/m}^3$ ). Az egyenlet alapján a tömör homok esetén  $\lambda = 0,32 \text{ W/mK}$ , laza homoknál pedig  $\lambda = 0,2 \text{ W/mK}$ . Azt látjuk, hogy a fenti grafikonon feltüntetett mérési eredményhez képest csekély az eltérés (0,3 és 0,24  $\text{W/mK}$ ).

Hasonló módon kiszámította a teljes telítettség esetére is a hővezetési tényezőt mindkét tömörség esetén. Ezek 2,9  $\text{W/mK}$  és 2,5  $\text{W/mK}$  értékre adódtak, amelyek teljes mértékben egyeznek a mérési adatokkal, ahogy a **3.17. ábra** grafikonjáról leolvasható. Ez természetesen abból adódik, hogy telített állapotban csak a szilárd alkotók és a víz adatait kell figyelembe venni, levegő nincs a rendszerben. **Megjegyzés:** A mérések eredményét összehasonlítva Stefanovits **3.8. ábrán** látható grafikonjával, elég jelentős eltérés tapasztalható. Figyelembe véve, hogy ott más a mértékegység [ $\text{J/cmC}$ ] a skála szerinti érték százszorosát kell összehasonlítani az itteni mérésekkel. Stefanovits diagramján kevésbé drasztikus a hővezetési tényező növekedése, mint a **3.17. ábra** szerint. Néhol ugyan olyan nedvességtartalomnál csak a harmada a hővezetési tényező az itt mért értékeknek. Az eltérés valószínű oka, hogy az én méréseimnél a talajban a elég sűrű gyökérzet is megtalálható, valamint a növénytakaró is befolyásolta az én méréseimnél a hővezetési tényezőt. Az én esetemben nem tisztán talaj hővezetési tényezőt mértem.

#### *Számítás no.2*

A szerző megvizsgálta Campbell (1985) [77] modelljét is, hogy az mennyire összeegyeztethető a mérési eredményekkel [37]. Eszerint a hővezetési tényező a következő

összefüggéssel is számítható:

$$\lambda = A + B\theta - (A - D)\exp[-(C\theta)^E], \quad 3.8$$

ahol A, B, C, D és E a talaj összetételétől függő együtthatók, amelyek a következők:

$$A = (0.57 + 1.73\phi_q + 0.93\phi_{rm}) / (1 - 0.74\phi_q - 0.49\phi_{rm}) - 2.8\phi_s(1 - \phi_s), \quad 3.9$$

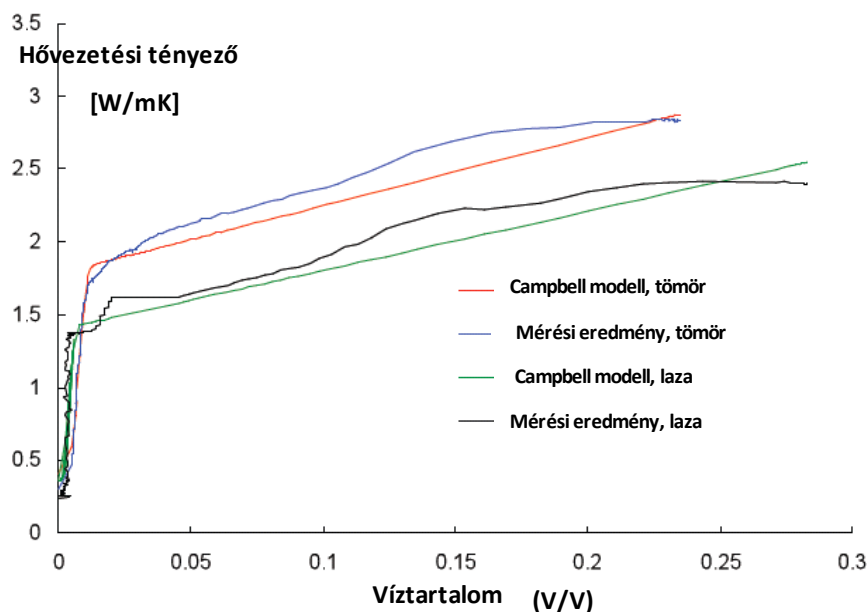
$$B = 2.8\phi_s, \quad 3.10$$

$$C = 1 + 2.6 / (m_c^{0.5}), \quad 3.11$$

$$D = 0.03 + 0.7\phi_s^2, \quad 3.12$$

$$E = 4, \quad 3.13$$

ahol a  $q$ ,  $r$ ,  $m$  és  $s$  indexek a kvarc, az egyéb ásványok és az egyéb szilárd alkotórészeket jelentik,  $m_c$  pedig az agyag frakciót.  $\theta$  a térfogati víztartalmat,  $\phi$  pedig a porozitást jelenti, azaz az egyes alkotórészek arányát a talajmintában. Az eredmények összehasonlítása az **3.19. ábrán** látható. Azt lehet mondani, hogy a Campbell-féle modell a  $\lambda$ - $\theta$  viszonyt meglehetősen nagy pontossággal szemlélteti, de a víztartalom függvényében a hővezetési tényező értékét kissé túlbecsüli a száraz és a telített tartományban is.



**3.19. ábra** A mérésből származó és a Campbell modellből számított hővezetési tényező értékek a víztartalom függvényében a #20/30 számú homokmintán tömör és laza állapotban

A fentiekben láttuk, hogy a talaj, mint különböző összetevők keveréke egy meglehetősen bonyolult és időben változó tulajdonságú rendszert alkot. A hőtechnikai paramétereinek meghatározása a számítások során minden esetben az alkotórészek egyenkénti értékeinek súlyozott átlagaként történik. Fontos, hogy jobban megértsük, hogy mi is történik a talajban hőtechnikai szempontból a víztartalom és a porozitás, a különböző összetevők arányainak,

mint peremfeltételeknek a változásával. Láttunk tisztán numerikus és félig empirikus számításokat is, amelyeket összehasonlítva a mérési eredményekkel azt mondhatjuk, hogy minden számítási mód egy-egy ponton meglehetősen közelíti a valóságot, de minden esetben a modellt az adott talajtípusra kell kalibrálni. Mindazonáltal a cél az, hogy például épületekkel összefüggésben (zöldtető, talajba épített létesítmények stb.) a talaj, mint épületszerkezet hőtechnikailag méretezhető legyen, és ehhez nagymértékben hozzájárulnak az ismertetett számítási és mérési módszerek. Az általam választott hővezetési tényező mérése egy közvetett módszeren alapul, amelyet a következőkben ismertetésre kerülő mérési rendszer felhasználásával végeztem el. Pontossága a tapasztalatok szerint nem sokkal rosszabb, mint a fenti módszereknek, és valószínűleg megfelelő közelítő eredményeket szolgáltat a számításaink részére.

## 4. A zöld tető mérési rendszere és mérési eredményi

A zöldtető hőfizikai problémái gazdasági, ökológiai okokból nagyon fontosak az épületfizika területén. Ami a zöldtetők vízháztartásbeli tulajdonságait, viselkedését illeti, a kutatások ezen a területen a legelőrehaladottabbak. A legfontosabb cél az lenne, hogy szabványos keretbe foglaljuk a zöldtető rétegeinek hőtechnikai tulajdonságait és ezeket felhasználni az épületekhez kötelezően csatolandó hőtechnikai számítások során. Ehhez egy matematikai modell felállítását tűztük ki feladatul, amelyet helyszíni mérésekkel kívánunk kontrollálni.

### 4.1. A vizsgált épület tetőszerkezete

Mérésekkel vizsgáltuk egy a 70-es években lapos tetővel épült, majd a tetőszerkezet egy részének zöldtetővel felújított óvoda tetejének hőmérséklet alakulását a tetőszerkezet egyes rétegeinek határán. Az adott épület kétféle tetőszerkezeti kialakítása remek lehetőséget adott a kétfajta szerkezet hőtani viselkedésének összehasonlítására is. Az későbbi részben zöld tetővel felújított óvodáról készült fényképet a **4.1. ábra** mutatja.

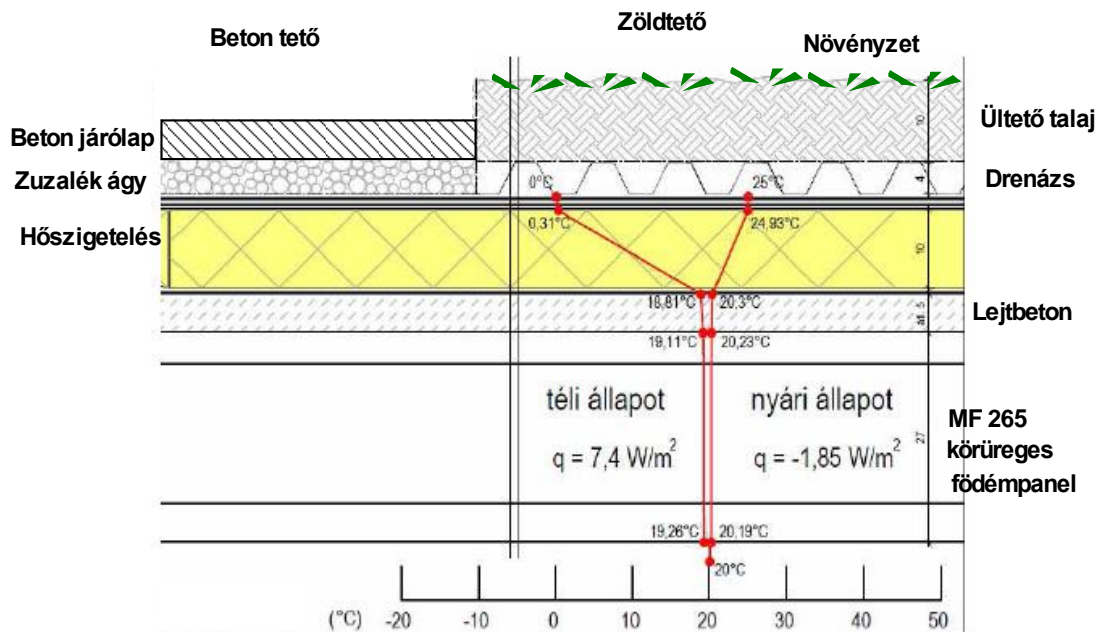


**4.1. ábra** A zöldtető és a betontető

A **4.2. ábrán** feltüntettük a zöld tető rétegeiben a hőmérséklet stacioner számítással meghatározott lefutását egy téli és egy nyári állapotra. A hőmérséklet eloszlás egy stacioner hőleadást vagy hőfelvételt mutat. A számítás részleteire a későbbiekben térek ki, a negyedik

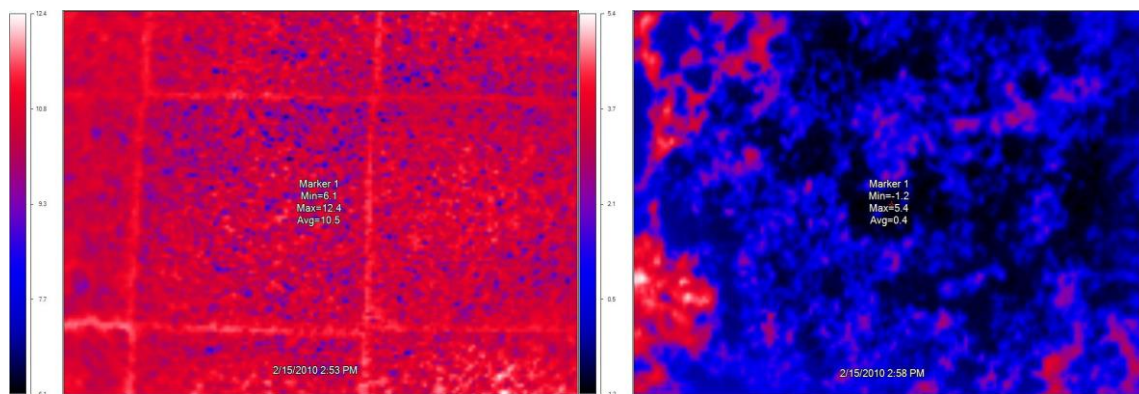
fejezetben.

A kiválasztott óvoda tetőszerkezetének kettős megoldású. Ezt a tetőszerkezetet kifejezetten azzal a céllal újították fel, hogy össze lehessen hasonlítani a kétfajta szerkezetet. A tetőszerkezet létrehozásában többek között Prekuta János vállalat vezető szerepet. A kétféle szerkezet lehetővé teszi, hogy egy épületen összehasonlítsuk a zöldtető és a betontető hőtechnikai jellemzőit. Ennek érdekében hőtechnikai méréseket végeztünk az általam kialakított merőberendezésekkel az épületen.

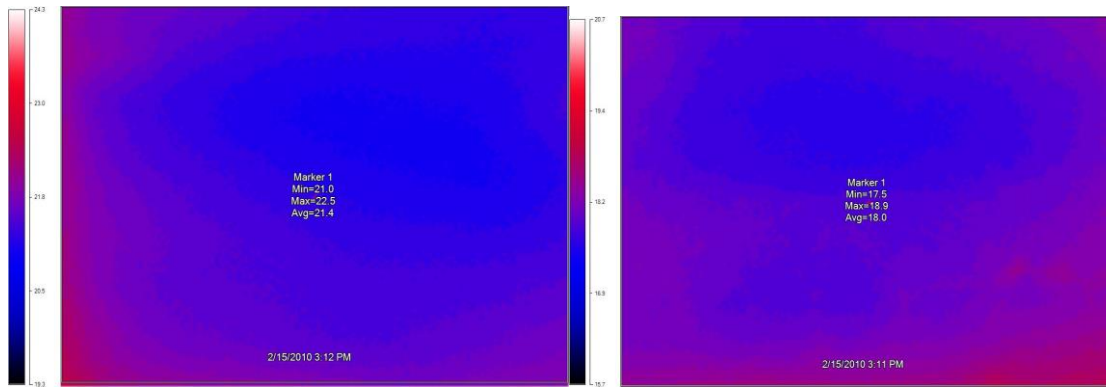


**4.2. ábra A betontető és a zöldtető rétegei és a zöldtető stacioner hőfokeloszlása**  
**Rétegek belülről kifelé:** körüreges vasbeton födémpanel, lejt beton, párazáró réteg, 10 cm vastag hőszigetelés, 2 rtg. mod. bitumen lemez csapadékvíz elleni szigetelés,  
 -betontető részen zuzalék ágy 4 cm és rajta 5 cm járólap  
 - zöldtetőn: geotextíliával kasírozott műanyag szivárgóréteg, 10 cm vtg. ültetőközeg.

Az épület energetikai vizsgálatára Prekuta János hasonló méréseket végzett. Ennek során hőkamerás felvételek is készültek, melyek látványosan mutatják be az energetikai előnyöket. A következőkben bemutatok néhány általa készített hőkamerás felvételt, amely egy téli napon készült (4.3. ábra).



**4.3. ábra a./ A betontető átlag (6,1<sup>0</sup> C) és a b./ zöldtető átlag(0,4<sup>0</sup> C) felszíni hőmérséklete**



**4.4. ábra Mennyezet a./ A betontető alatt (18<sup>0</sup> C) b./ zöldtető alatt (21,4<sup>0</sup> C)felszíni**

A betontető felszíne melegebb, mint a zöldtetőé és a belső mennyezet hőmérséklete a betontető alatt kisebb, mint a zöldtető alatt (4.4. ábra). Így a zöldtető hőszigetelése nyilvánvalóan jobb, mint a betontetőé.

Hogy a két tetőszerkezet pontosabb viselkedéséről képet kapjunk, ezért kiépítettünk egy mérőrendszert, amellyel közel egy éven keresztül vizsgáltuk mindkét tetőszerkezet rétegei között kialakuló hőmérsékletek változását. Előre bocsájtom, hogy a valóságos mérési eredményeink messze nem mutattak stacioner hőfokmegoszlást. De mielőtt ennek bemutatására rátérnék részletesebben ismertetném a hőmérsékletmérő berendezést.

## 4.2. A hőmérsékletmérő berendezés



**4.5. ábra a zöldtető és a betontető a mérőberendezéssel**

A kép bal oldalán látható a zöldtető, a jobb oldalán, a korlát mögött, pedig a járólappal ellátott betontető. Látható még az adatgyűjtő egység (cseréppel lefedve), amelyről majd bővebben ejtünk szót. A mérések során mind a zöldtető egyes rétegei, mind a betontető egyes rétegeinek határán végeztünk méréseket közel egy éven keresztül. Így mind a nyári, mind a téli időszakra

jellemző eredményeket rögzítettük. Mindkét tető rétegendjét a **4.2. ábra** szemlélteti. Az ábrán csak a főbb rétegeket és azok vastagságát (cm-ben) tüntettük fel. A két tetőfél két felső rétege különbözik csak egymástól. A teherhordó réteg, a hőszigetelés és a vízszigetelés mind a két oldalon egyforma. A zöld tető össz-vastagsága kb. 5 cm-vel meghaladja a betontető vastagságát.

A mérőrendszer elektronikai egységét egy megfelelő időjárás elleni védelemmel láttam el (**4.6. ábra**). A **4.5. ábra** felső részén ez látható. Ez egy megfelelő csapadék és szél elleni védelemmel ellátott tetőcseréppel védett tér. Oldalról nyitott, hogy a megfelelő hűtés biztosítva legyen. Ez az egység tartalmazza a külső levegő hőmérsékletének mérésére kialakított szondát is. Tehát a levegő hőmérsékletét árnyékos térben mértem.



**4.6. ábra A védelmet ellátó egység az elektromos vezérlő egységgel, az elektromos teleppel és a mérőkábelekkel**

Két darab ilyen műszert telepítettünk a mérés helyszínét adó óvodára. Az egyiket a beton csupasztetőre, a másikat pedig a zöldtetőre. Egy műszerhez nyolc darab hőmérsékletmérő szonda tartozik, amelyek a tető különböző rétegeiben vannak elhelyezve a teljes körű hőmérsékleti térkép elkészítése érdekében.

A mérőműszer percenként végzi a méréseket, és egy értéket 5 mérés átlagaként számít ún. csúszó ablakos átlagolással. A mérőműszer pontossága kb.  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ .

Nem csak a tető különböző rétegei között, hanem az épület déli és nyugati oldalfalain, valamint a belső térben is kialakítottunk egy-egy mérési pontot, hogy a teljes épületre vonatkozó hőveszteség számítható legyen, így a zöldtetőre vonatkozó adatok tovább



pontosíthatók.

Az egyedi gyártású elektronikai mérő és adatgyűjtő egység (4.7. ábra) az alábbi elemekből tevődik össze:

- PIC18F4550 típusú microcontroller vezérlő egység
- LM 35 termisztor, ellenállás alapú hőmérséklet mérő egység
- Micro SD memória kártya adattároló
- RS5C348 realtimeclock, trigger jel adó óra
- CR2032 egyenáramú áramforrás az órához, illetve 4 db AA egyenáramú áramforrás a méréshez
- kétrétegű lyukgalvanizált nyomtatott áramkör



**4.7. ábra** A PIC18F4550 típusú microcontroller vezérlő egység a csatlakozó mérővezetékekkel, az adattároló SD kártyával és CR2032 egyenáramú áramforrás az órához

#### 4.2.1. A hőmérséklet érzékelő szonda leírása és várható pontossága

A mérőrendszerbe az LM35 IC alapú hőmérséklet érzékelőt építettünk be (4.8. ábra), minden egyes mérési pontba. A Texas Instrument által gyártott műszer főbb jellemzői a következők:



talajjal borítva.

„Zöldtető talaja” ez a hőmérő közvetlen a talaj felszínére volt elhelyezve, a növényzet némileg körbe vette. Ennyiben különbözik az előző érzékelőtől.

„ Talaj alja” a zöld tető talajának alján a drenázs felületén volt.

„Szigetelés felett” ez a hőmérő a talajjal fedett részen a hőszigetelésre a drenázs aljára volt telepítve.

#### **Beton tetőre telepített érzékelők:**

„Járólap teteje”

„ Járólap alja”

„ Zuzalék alja” ez megfelel a szigetelés feletti mérési helynek.

A „Levegő” megjelölésű érzékelő a **4.6. ábrán** lévő mérőegység cserép alatt lévő pontjában mérte a tető feletti hőmérsékletet úgy, hogy a napsugárzás ne érje, de a légáramlat tudja hűteni.

A „Beltér” mérőpontja a plafon közelében a belső tér egy pontjában regisztrálta a hőmérsékletet. Ez gyakorlatilag a mennyezet felszíni hőmérsékletének tekinthető.

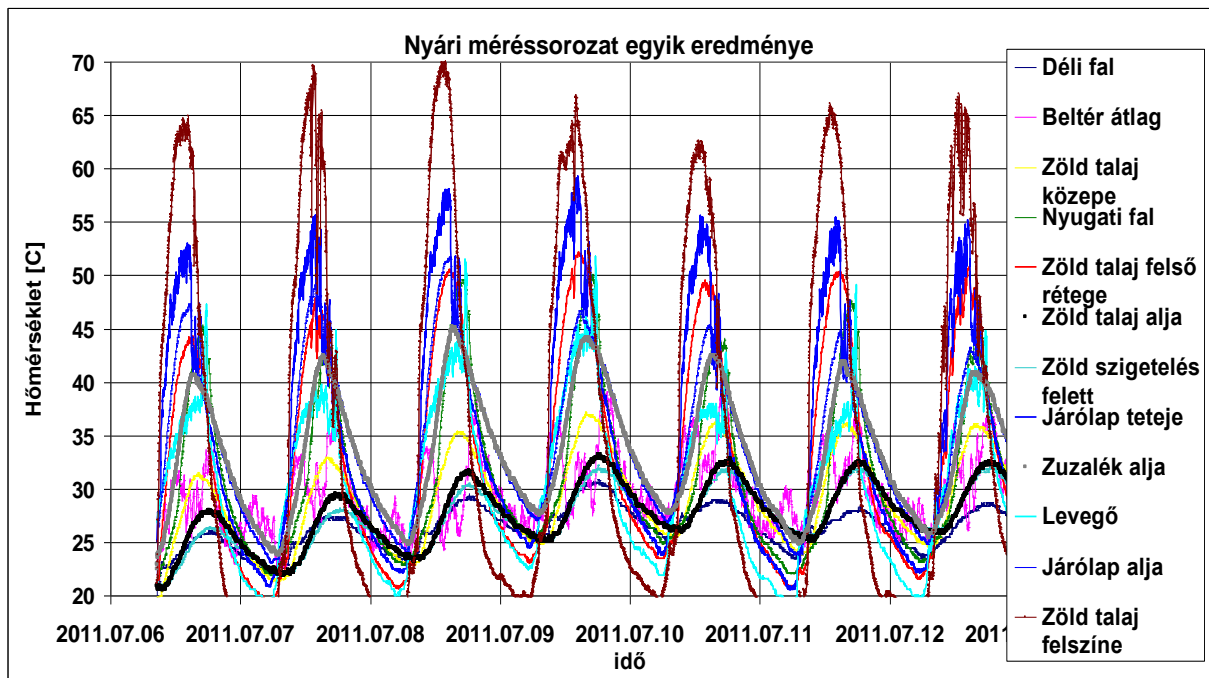
A „Nyugati fal” és a „Déli fal” érzékelői a tető síkjától kb. 1m-el lejjebb a falra rögzítve mérték a hőmérsékletet.

#### **4.3.2. A mért eredmények értékelése**

Elsődlegesen ismertetünk néhány fontos mérési eredményt, de a későbbiekben még visszatérünk fontosabb részeredményeire is. A nyári és a téli állapot alapvetően különbözik egymástól. Vizsgáljuk meg a fontosabb jellemzőit ezeknek a mérési eredményeknek.

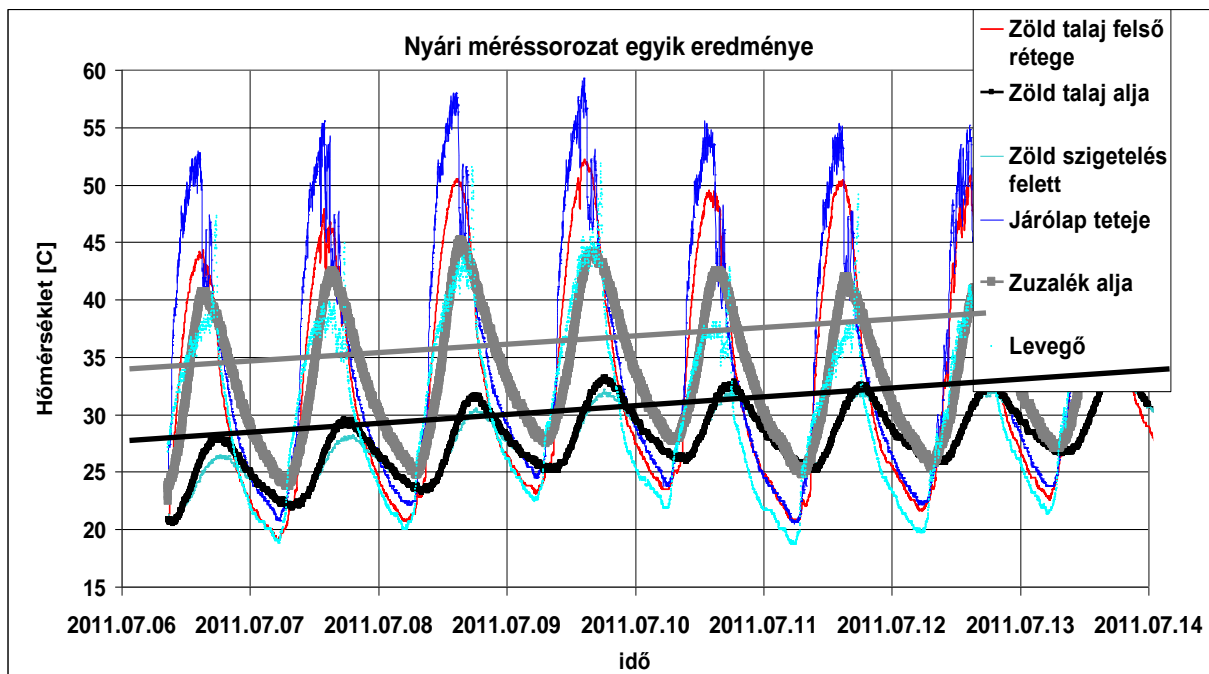
##### **Nyári mérési állapotok**

Nézzük a nyári mérési eredmények fő jellegzetességét. A **4.9. ábrán** feltüntettük az összes mért hőmérsékletet hét napon keresztül. Minden hőmérséklet görbén jól látható a napi periodicitás. A „Talaj felszíne” érzékelő mutatja a legnagyobb ingadozást. Ez a fekete talajon lévő érzékelőt jelenti. 15 és 70 fok között változik a hőmérséklete. Ennek az érzékelőnek az eredményeit fenntartással kezeltük, ha nagy volt a besugárzás. A „Zöld talaj felső rétege” már kisebb ingadozást mutat, a növényzet enyhe árnyékolása miatt. A továbbiakban ennek az értékei tekintettük mérvadónak a talaj felszínhőmérséklete szempontjából. A belső rétegek hőingadozása jóval kisebb. A felszínen lévő érzékelők jelében elég sok látszólag indokolatlan ugrás látható. Ennek oka az, hogy az óvoda épületét jegenyefák veszik körül. Ezek bizonyos napszakokban árnyékot vetettek a hőmérséklet érzékelőkre. Ezeket a diagramokon tapasztalható gyors változások jelzik.



4.9. ábra Egy nyári mérésorozat eredményei

Jobban áttekinthető diagramot készíthetünk, ha csak néhány érzékelő adatsorát ábrázoljuk egy diagramon. A 4.10. ábrán jobban áttekinthetjük a mérési adatok további sajátosságait.



4.10. ábra Derült nyári napok válogatott eredményei

A nyári összehasonlító diagramon megfigyelhetünk több dolgot a zöld tető és a járólappal ellátott tető összehasonlításában.

## A hőmérséklet-függvények amplitúdó változásai:

A zöld tető és a járólap teteje követi a be- és kisugárzás változásait. A zöld tető felső rétege (piros) nappal sokkal melegebb, mint a levegő, éjjel kb. azonos hőfokú, mint a környező levegő. Az eltérő hőmérséklet nappal a napsugárzásnak köszönhető. A járólap felső felülete éjjel és nappal is melegebb, mint a levegő hőmérséklete. Nappal jobban felmelegszik, mint a zöld tető felső rétege. Az ábrába berajzoltuk a vizsgált hét nap alatt a zöld tető talajának alján (fekete egyenes vonal) és a beton tető zúzalékának alján (szürke egyenes vonal) kialakuló átlagos napi hőmérséklet változását. A zöld talaj alja  $24^{\circ}$ -ról  $29^{\circ}$  C-ra melegedett, a zúzalék alja  $30^{\circ}$ -ról  $37^{\circ}$  C-ra melegedett. Itt megjegyzem, hogy a két mérési hely a tető felszínétől befelé a tetőszerkezetbe kb. 10 cm távolságra helyezkedik el a zöld tető és a betontető esetében is. (A hőmérséklet alakulásának ilyen ábrázolását a globális felmelegedéssel foglalkozó tanulmányok előszeretettel alkalmazzák.)

## Fáziseltolódás az egyes görbék között

A hőmérséklet görbék napi periodicitása is látható a görbéken, de ha egy napot ábrázolunk, akkor (ld. **4.11. ábra**) még jobban követhető. A jobb felbontásnak köszönhetően, az egyes függvények közötti fáziseltolódás itt még jobba szembetűnő. A belső rétegek fáziseltolódásában vannak a felszíni hőmérséklet függvényekhez képest.

A levegő hőmérsékleti maximuma kb. 2 óra eltolódásban van a felszíni maximumhoz képest. A zöld tető talajának alja kb. 5-6 órai eltolódásban van a felszínhez képest. A betontetőn a zúzalék alja (szürke vonal) kb. 2 órai eltolódásban van a felszíni „Járólap teteje” hőmérsékletekhez képest. Ez csak a harmada az eltolódás a zöld tető eltolódásának. A zöld tető hőtehetetlensége tehát nagyobb.

A zöld tető talajának jobb hőszigetelését olvashatjuk le a zöld tető talajának alján és a járólapos tető zúzott kő rétegének alján mért hőmérsékletek összehasonlításából is. A tető rétegszerkezete ez alatt a réteg alatt mind a zöld tetőnél, mind a járólapos tetőnél egyforma rétegekből áll.

A fenti képen a hőmérsékletingadozás napi menetét láthatjuk. Tisztán kivehető, hogy a zöldtető és az épületszerkezet között (piros vonal  $15-20^{\circ}$  C-os hőmérséklettartományban) mennyivel kiegyensúlyozottabbak a napi hőingadozások, mint a különböző hagyományos tetőkön mért hőmérsékletek és a kinti léghőmérséklet esetében. Ez a rendkívüli kiegyensúlyozottság három okra vezethető vissza.

1./Az első: magának a zöldtető rétegrendnek a nagy hőkapacitása (az ültetőközeg talajkeverék a növényzet és a bennük levő víz együttesen eredményezi ezt a kiugróan nagy hőtehetetlenséget).

2./ A második: A zöldtető rétegek további hőszigetelő tulajdonsága (itt már a további légrétegnek is rendkívül nagy szerepe van).

3./ A harmadik pedig, aminek a hatása a legnehezebben számszerűsíthető, ám szintén rendkívül nagy jelentőségű, az a növények életfolyamataiból adódó hűtő hatás. Mindenféle számítás nélkül meg kell jegyeznünk, hogy a növényzet a beeső napsugárzás akár 65-70 %-át képes kémiai energiává alakítani.

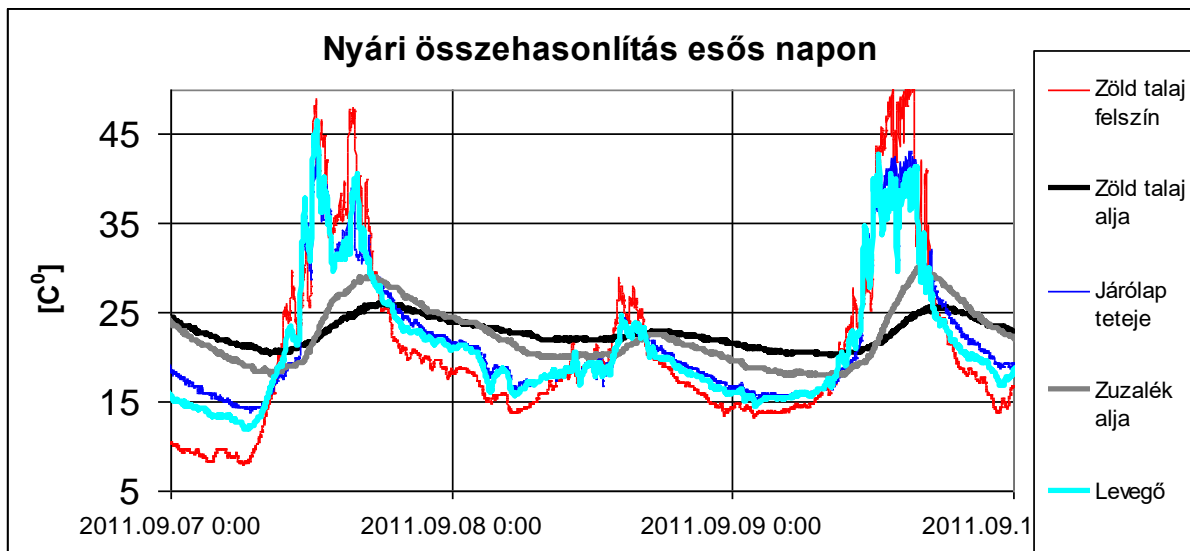
A zöld tető talajának alja  $3-5^{\circ}$  C-al hűvösebb marad éjszaka, mint a zúzott kő alján mérhető hőmérséklet. Ez annak köszönhető, hogy a zöld tető talaja jobban szigetel, mint a járólapos

tető zúzott kő rétege és a járólapok. A nagy különbséget a nappali állapotban lehet lemérni, amikor is a zúzott kő réteg alatt  $10-15^{\circ}\text{C}$ -al is melegebb hőmérséklet alakul ki a járólapok zúzott kő rétege alatt, mint a zöld tető talajának alján. Így jól láthatóan nyáron a zöld tető jobban szigeteli a kintről érkező hőterhelést.

Még egy fontos körülményre fel kell hívni a figyelmet, hogy a zöld tető másként viselkedik nappal, és másként viselkedik éjszaka. Itt arra kell gondolni, hogy a növényzet a nappali erős napsugárzásban jobban párologtat, mint éjszaka. Ez annyit fog jelenteni a tetőszerkezet matematikai modellezésénél, hogy zöldtető talajának a hőtechnikai adatai mások lesznek éjszaka, mint nappal. Tehát időben változni fognak a hőtechnikai jellemzői. De mint később a matematikai modellezésnél kiderült, a zöld tető talajának hővezetése nem csak időben változik, hanem a hely függvényében is. A talaj felső rétegében lévő növényzet, főként a párologtatás folytán nagyon sok hőt von el, vagy másképpen fogalmazva, nem enged be a talaj alsóbb rétegeibe, tehát nagyon jó hőszigetelő! Az alsó talajréteg viszont már kevésbé párologtat, tehát ott már nem olyan jó a hőszigetelő képessége. A matematikai modellezésnél a talaj hővezetésének térbeli és időbeli változását külön megfontolások alapján tárgyaljuk. A hővezetési tényező megfelelő matematikai függvényét a mérési adatok alapján állítottuk fel. (Lásd később a matematikai modellezésnél.)

(Itt meg kell azonban jegyezni, hogy a zöld tető 10 cm rétege alatt egy 4 cm drenázs réteg is van, a zúzott kő csak 4 cm és a járólap 5 cm vastag. A zöld tető felső rétege összességében 5 cm-el vastagabb, mint a járólapos tetőé. Ez alatti rétegek száma és vastagsága megegyezik a kétféle tetőnél.)

A mérési adatok közül kiválasztottunk egy nyárvégi esős napot is, amikor a napsugárzás csak kis mértékben befolyásolta a tető felszíni hőmérsékletét. A felszíni déli hőmérsékletek mintegy  $20^{\circ}\text{C}$ -kal alacsonyabbak, mint az előtte és utána lévő déli órákban. Az alsó rétegekben a zöld tetőnél ez csak  $5^{\circ}\text{C}$ , míg a zúzalék alján ez kb.  $10^{\circ}\text{C}$  eltérést jelentett.



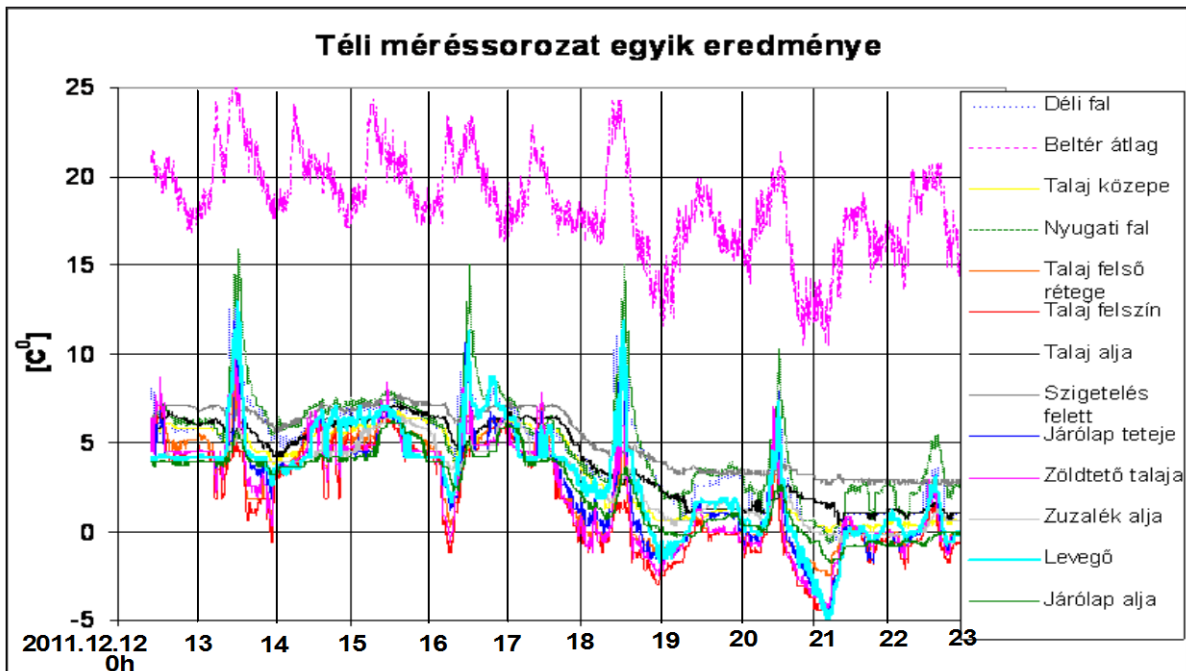
**4.11. ábra Nyárvégi esős nap eredményei**

A zöld tető talajának alja kevésbé hűl le, mint a zúzott kő alján mérhető hőmérséklet. Ez annak köszönhető, hogy a zöld tető talaja jobban szigetel és nagyobb a hőtehetetlensége is, mint a járólapos tető zúzott kő rétege és a járólapok. Esős időben is a hőingadozás a nedves zöld tetőben továbbra is kisebb, mint a zúzott kő réteg alatt. Nyáron a zöld tető jobban

szigeteli, csillapítja a kintről érkező hőterhelést, illetve az éjszakai lehülést.

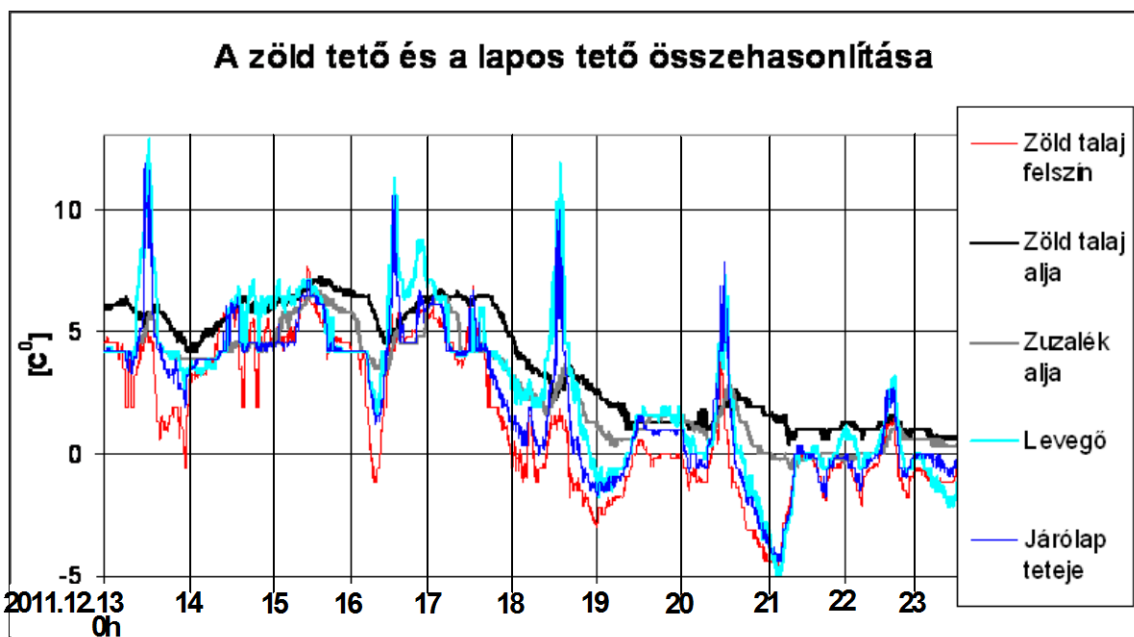
### Téli mérési állapot

A 4.12 ábrán feltüntettük az összes mért hőmérséklet tizenegy napon keresztül. Itt a vízszintes tengelyen naponként van egy-egy osztás. A hőmérséklet görbéken nem látható a napi periodicitás. A „Levegő” és a „Nyugati fal”érzékelők mutatják a legnagyobb ingadozást.



4.12. ábra Egy téli méréssorozat eredményei

A többi érzékelő ingadozása 10<sup>0</sup>C belül található. A tizenegy napos periódusban a külső hőmérséklet fokozatosan csökkent. Ennek megfelelően a többi hőmérséklet is tendenciájában csökkenést mutat. A karácsony előtti időszakra esett a mérés, így az óvoda is bezárt karácsony előtt. A belső fűtést is levették, ez látható a belső hőmérséklet tendenciózus csökkenésében.



4.13. ábra Egy téli sorozat válogatott eredményei

A téli összehasonlító diagramon több dolgot figyelhetünk meg a zöld tető és a járólappal ellátott tető összehasonlításában.

A zöld tető és a járólappal ellátott tető követe a külső hőmérséklet változásait. A zöld tető felső rétege (piros)  $1-1,5^{\circ}\text{C}$ -kal alacsonyabb hőfokú, mint a levegő és kb. egy órával később követi a levegő hőmérsékletének változását. Az alacsonyabb hőmérséklet a kisugárzásnak köszönhető. A járólappal ellátott tető felső felülete  $1-1,5^{\circ}\text{C}$ -kal melegebb, mint a zöldtető felszíne, ez az épületből megszökő többlet hő miatt alakul ki. Rosszabb a hőszigetelése a járólappal ellátott tetőrésznek.

A zöld tető talajának jobb hőszigetelését olvashatjuk le a zöld tető talajának alján és a járólappal ellátott tető zúzott kő rétegének alján mért hőmérsékletek összehasonlításából is. A zöld tető talajának alja  $1,5-2^{\circ}\text{C}$ -al melegebb, mint a zúzott kő alján mérhető hőmérséklet. A zöld tető talaja jobban szigetel, mint a járólappal ellátott tető zúzott kő rétege és a járólappal ellátott tetők. (Itt is meg kell azonban jegyezni, hogy a zöld tető 10 cm rétege alatt egy 4 cm drenázs réteg is van, a zúzott kő csak 4 cm és a járólappal ellátott tető 5 cm vastag. A zöld tető felső rétege összességében 5 cm-el vastagabb, mint a járólappal ellátott tetőé. Az ez alatti rétegek száma és vastagsága megegyezik a kétféle tetőnél.)

### 4.3.3. A hőmérséklet mérési eredmények vizsgálata frekvencia tartományban

A nyári és a téli mérések között mutatkozó egyik lényeges különbség, hogy míg a nyári adatokban jól látható a napi periodicitás, addig a téli adatsorokban ez nem fedezhető fel. Ennek természetesen időjárás okai vannak. Míg nyáron nagy a hőingadozás  $15-20^{\circ}\text{C}$  fok a nappalok és az éjszakák között, addig télen ez csak néhány fokot tesz, ki.

A periodikus függvényeket szokás vizsgálni Fourier-analízis segítségével. Egy adott, általában időfüggvényt szinusz és koszinusz függvények sorozatával közelítünk meg. Általános képlettel felírva.

$$f(t) \cong \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos nt + b_n \cdot \sin nt$$

vagy komplex számok és véges sorozat felhasználásával felírva

$$f(t) = \sum_{k=-N}^N C_k e^{i(k \cdot \omega \cdot t)}$$

Ahol  $i = \sqrt{-1}$  az imaginárius egység,  $k$  futó index,  $\omega_k$  a változó körfrekvencia,  $C_k$  komplex együttható.

Ha  $N$  elég nagy, a sor előállítja a jelet. A frekvencia komponenseket harmonikus komponenseknek nevezzük.

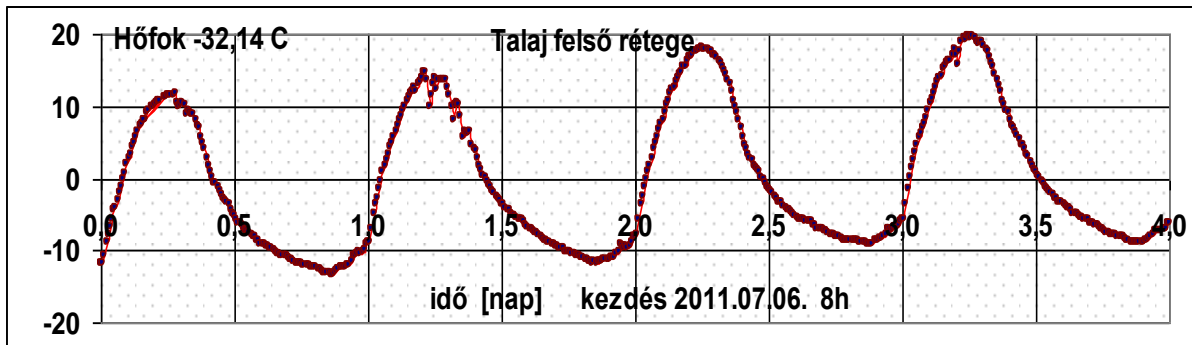
Egy adott  $f(t)$  függvényt bizonyos értelemben jellemzik a Fourier-együtthatói. Ennek alapján lehetőség van arra, hogy az általában bonyolultabb  $f$  függvényt (időben változó jelet) egy sok vonatkozásban egyszerűbb számsorozattal adjunk meg. Ezt a műveletet Fourier-analízisnek nevezzük: áttérünk az időtartományból a frekvenciatartományba. A fordított eljárást – amikor az együtthatókból rekonstruáljuk a függvényt – Fourier-szintézisnek nevezzük.

Diszkrét pontokból álló függvényekre –ami a méréseinkből kapott hőmérsékletsor-alkalmazható az eljárás. Az elmélet részleteit nem tárgyalva nézzük meg egy nyári és egy téli hőmérsékletsor Fourier- analízisének eredményét. További részleteket a [65], [72] és [6]

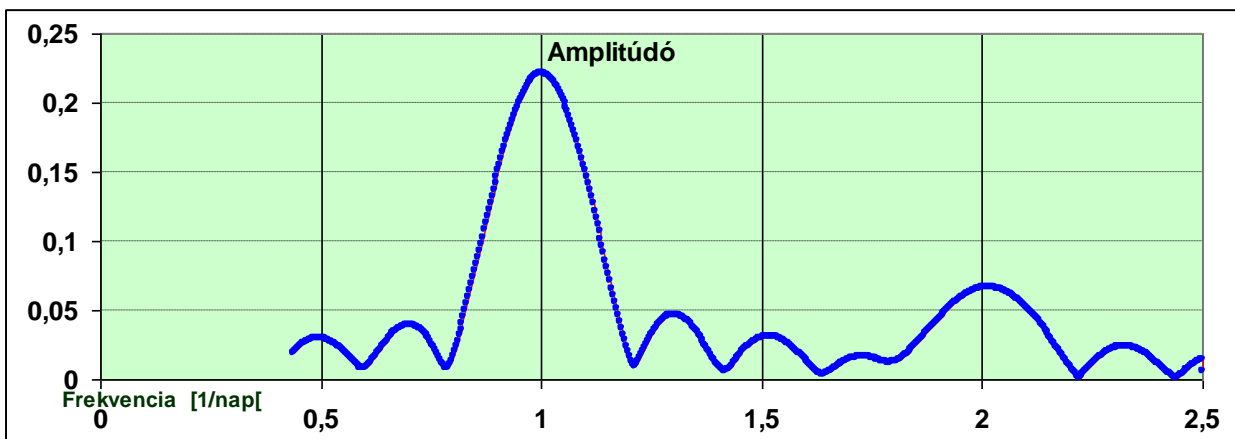
Elsőként egy nyári hőmérséklet megoszlás Fourier analízisét végeztük el. A tényleges



hőmérsékletekből levontuk az adatsor átlagos értékét, így csak a periodikusan változó függvényrészt ábrázoltuk. Ennek időfüggvényét a **4.14. ábra** mutatja, ahol öt napos mérési tartományt vizsgáltunk.



**4.14. ábra** Nyári nap hőfokfüggvénye az időben  
(A függvényértékekből le van vonva az átlag érték)



**4.15. ábra** Nyári nap hőfokfüggvénye (amplitúdók) frekvencia tartományban ábrázolva

Az analízist [36] George Lungu „excelunusual.com” programjának adaptálásával végeztem el. Az eredmény a **4.15 ábrán** látható. Az egynapos periódusidejű jel kiugróan magas 0,22 amplitúdóval szerepel az analízisben. További frekvenciákon is megjelennek nagyobb amplitúdók, de azok fél nagyságrenddel kisebbek legalább. Így a Fourier-analízisből jól látszik a függvény domináns napi periodicitása.

Az együtthatók meghatározását a következőképpen végeztem:

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(x) \cdot \cos\left(n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{T} t\right) \cdot dt \quad b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(x) \cdot \sin\left(n \cdot \frac{2 \pi}{T} \cdot t\right) \cdot dt$$

, ahol  $a_n$  és  $b_n$  Fourier együtthatók.

A jelen esetben négy periódust vizsgáltam, így a kifejezések diszkrétizált formája a következő:

$$a_n = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=0}^{576} f(t_j) \cdot \cos\left(n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{I} t_j\right) \cdot \Delta t \quad b_n = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=0}^{576} f(t_j) \cdot \sin\left(n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{I} t_j\right) \cdot \Delta t$$

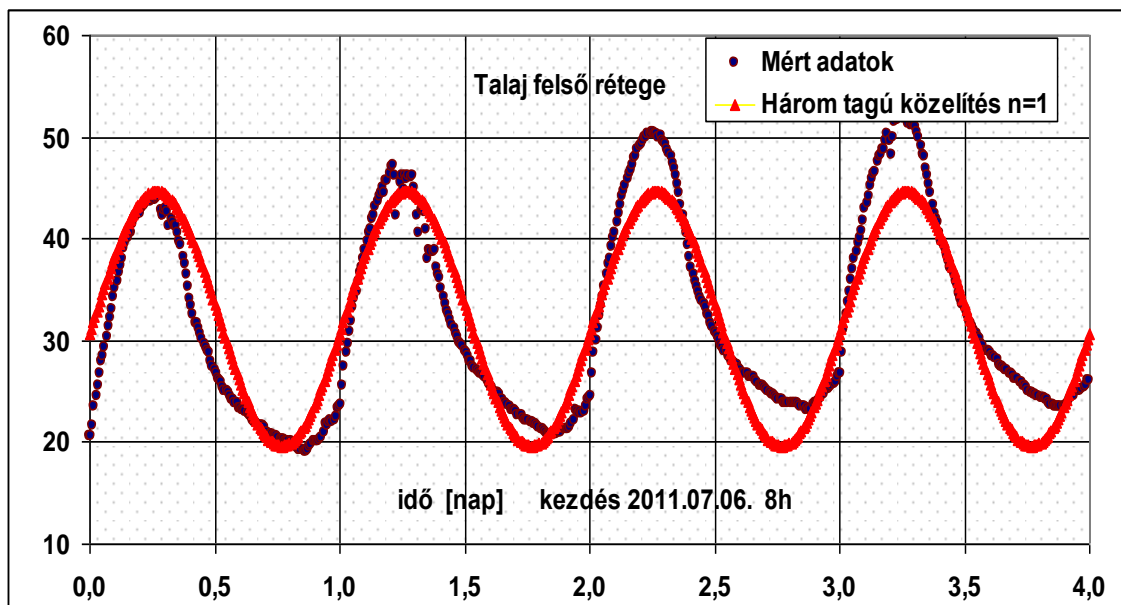
Itt  $j$  az időlépések futó indexe,  $\Delta t$  az egyes időlépések közötti eltelő idő, ami jelen esetben állandó, így  $t_{j+1} = t_j + \Delta t$ . A számításokban négy periódusra számoltam ki a szumma értékét, így adódott az  $\frac{1}{2}$ -es szorzó a szumma jel előtt.  $\omega_n = n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{1} = \frac{2 \cdot \pi}{1/n} = \frac{2 \cdot \pi}{T}$  az adott

Fourier tag körfrekvenciája  $1/\text{nap}$  dimenzióban mérve. A nevezőben szereplő  $T$  jelenti az egyes harmonikus tagok periódus idejét. A nevezőben szereplő egyes, az egy napos periódus időt jelenti. Az első szinuszos és koszinuszos tag körfrekvenciája  $\omega_1 = 1 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{1} = \frac{2 \cdot \pi}{1}$ ,  $T_1 = 1 \text{ nap}$  a második tagoké  $\omega_2 = 2 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{1} = \frac{2 \cdot \pi}{1/2}$ ,  $T_2 = \frac{1}{2} \text{ nap}$ , a

harmadik tagoké  $\omega_3 = 3 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{1} = \frac{2 \cdot \pi}{1/3}$ ,  $T_3 = \frac{1}{3} \text{ nap}$  stb. Az  $n=2$  esetében a periódus idő fél nap,

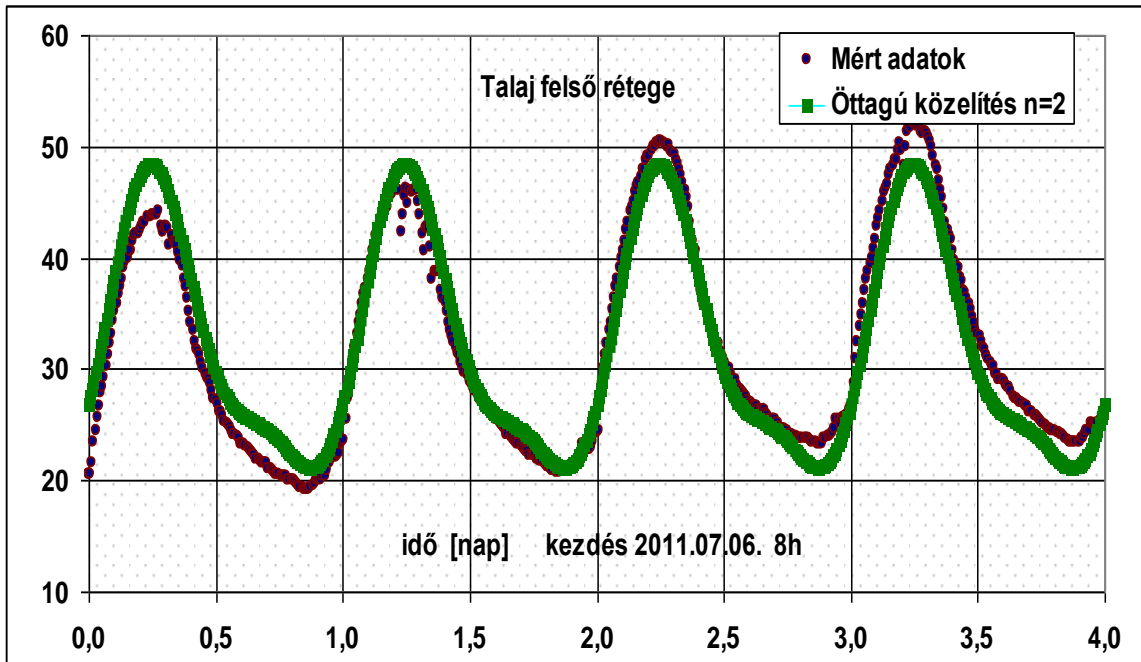
az  $n=3$  esetében pedig  $1/3$ -ad nap, vagy másképp fogalmazva  $n=1$  esetén egy nap alatt egy periódust,  $n=2$  esetén egy nap alatt két periódust,  $n=3$  esetén egy nap alatt három periódust ír le az adott szinuszos és koszinuszos tag.

Bemutatom a közelítés jóságát  $n=1$  kettő és három értékre. Az eredményeket diagramokban ábrázoltam:



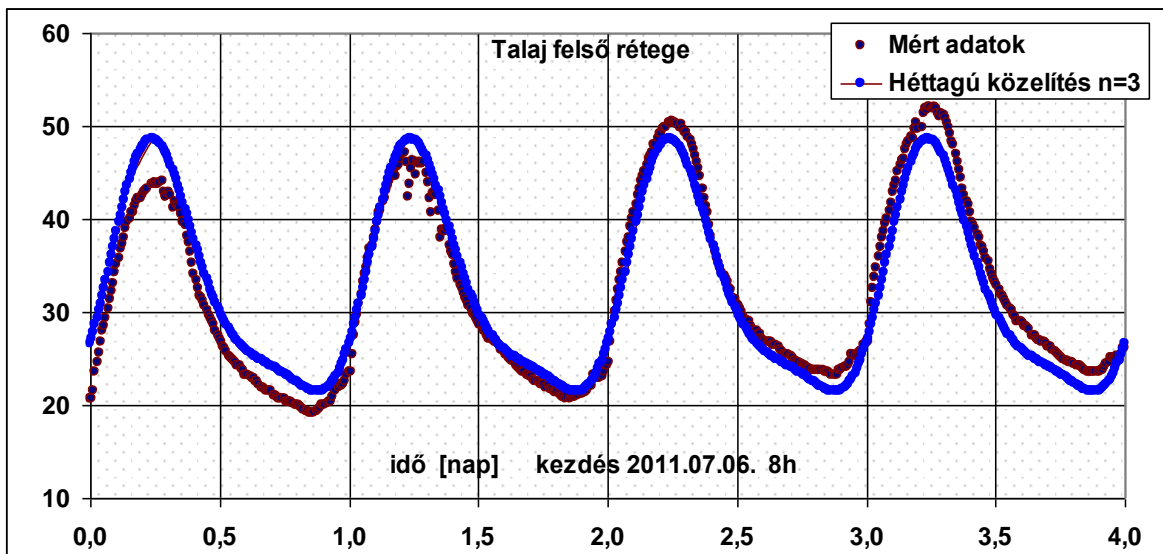
4.16. ábra Nyári nap hőfokfüggvénye közelítve

$$f(t) \cong 32,14 - 1,45 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) + 12,43 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{1} \cdot t\right)$$



4.17. ábra Nyári nap hőfokfüggvénye közelítve

$$f(t) \cong 32,14 - 1,45 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) + 12,43 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) - 3,83 \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) + 1,193 \cdot \sin\left(\frac{4 \cdot \pi}{1} \cdot t\right)$$



4.18. ábra Nyári nap hőfokfüggvénye közelítve

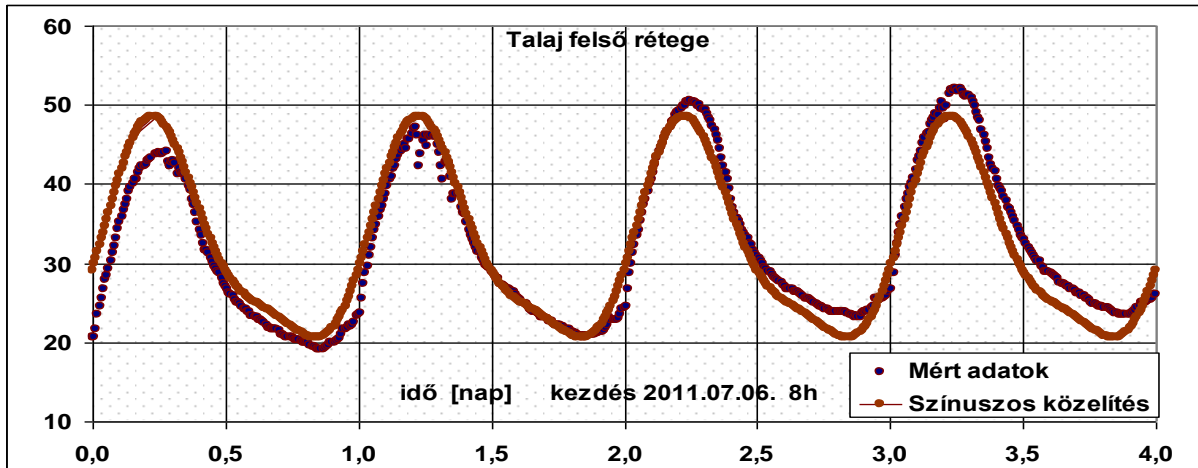
$$f(t) \cong 32,14 - 1,45 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) + 12,43 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) - 3,83 \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) + 1,193 \cdot \sin\left(\frac{4 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) - 0,32 \cdot \cos\left(\frac{6 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) - 0,14 \cdot \sin\left(\frac{6 \cdot \pi}{1} \cdot t\right)$$

közelítő hőmérséklet függvény (T) változása az időben (t) az analízis alapján a következő. A Fourier-analízissel kimutathatók az egyes hőmérsékletfüggvények fázisszögeinek az eltérései is. Ezzel nem fárasztjuk az olvasót, hiszen az időjelekből ez jól kiolvasható. Viszont bemutatom a mért időjel közelítését csak szinuszos Fourier-sorral és fáziseltolással,

pontosabban annak első két periodikus tagjával. Az időjel periodicitása olyan jó, hogy két tagból álló Fourier-sorral egészen elfogadható módon közelíthető.

$$T(t) = 12 \cdot \sin[2\pi \cdot t] + 3 \cdot \sin[4\pi \cdot t - 1]$$

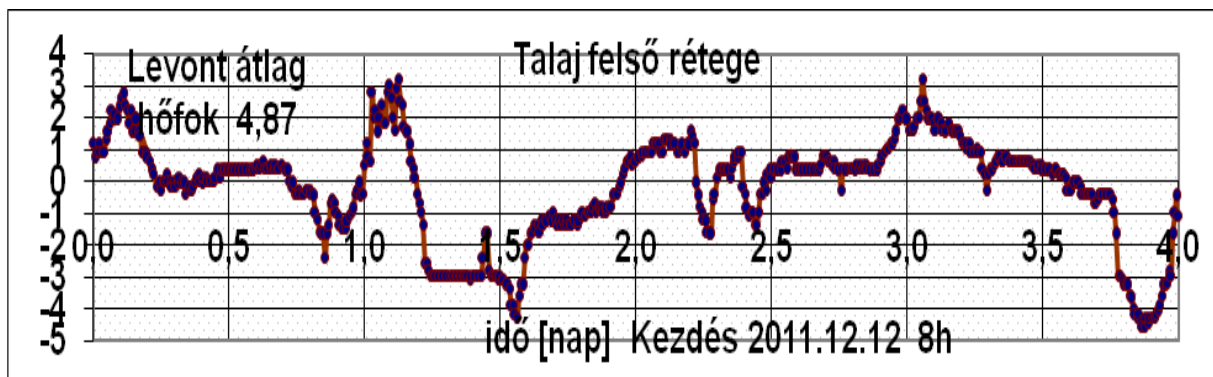
A közelítő függvény grafikonját és a mérési adatokat a **4.19 ábra** mutatja. Természetesen a közelítés tovább javítható, ha a Fourier- analízisben szereplő többi összetevőt is belevesszük az egyenletbe.



**4.19. ábra** Nyári nap hőfokfüggvénye közelítve csak szinuszos tagokkal

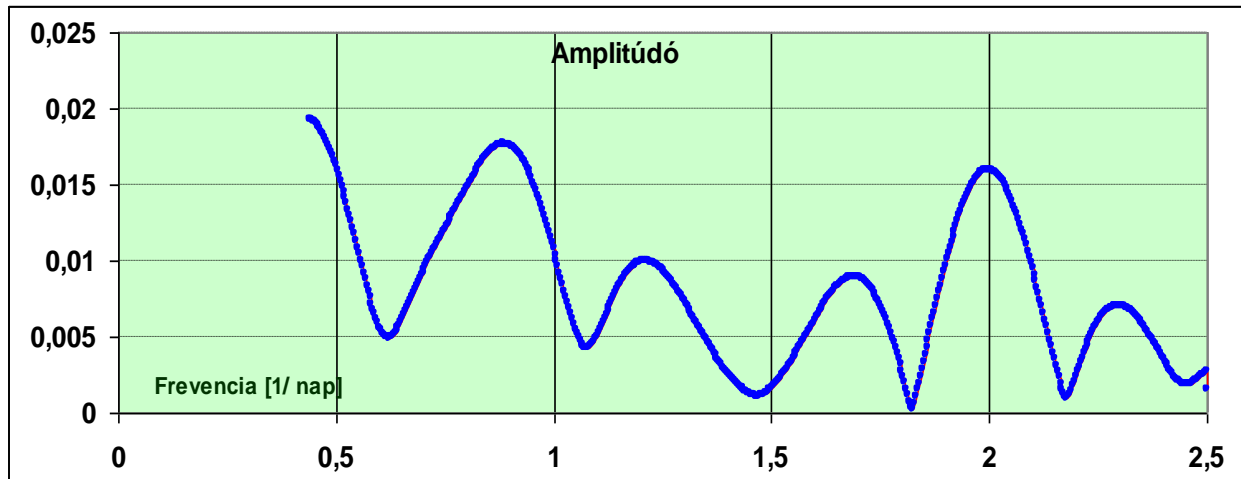
$$f(t) \cong 32,14 + 13,12 \cdot \sin\left[\frac{2 \cdot \pi}{1} \cdot t\right] + 3,6 \cdot \sin\left[\frac{4 \cdot \pi}{1} t + 1\right]$$

A fent már megjelenített jelek közül kiválasztottam a téli mérésekből ugyancsak a talaj felső rétegének időjelét, amit a **4.20 ábra** mutat. A tényleges hőmérsékletekből itt levontam az adatsor átlagos értékét, így csak a periodikusan változó függvényrészt ábrázoltam. Az átlag levonásával kapott grafikon szemléletesebben mutatja a függvényt.



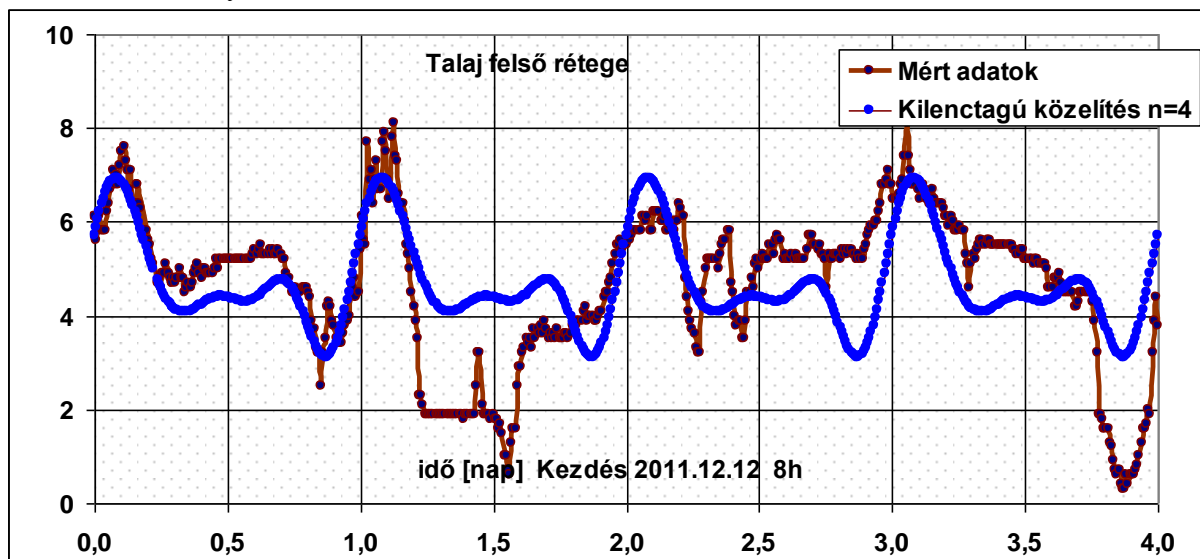
**4.20. ábra** Téli nap hőfokfüggvénye az időben  
(A függvényértékekből le van vonva az átlag érték  $4,87^{\circ}\text{C}$ )

Elvégezve a Fourier-analízist, az eredmény a **4.21. ábrán** látható. A grafikonon nem tudunk kiválasztani domináns jelfrekvenciát, ez annyit jelenti, hogy nincsen jellemző periodicitása a jelnek. A Fourier analízis is igazolta a szemlélet alapján is belátható eredményt. A fázisszög analízisnek ebben az esetben nem lenne különösebb értelme, mert nem lehet azonosítani a beérkező vagy távozó hőmennyiség terjedését a rétegeken keresztül.



**4.21. ábra** Téli nap hőfokfüggvénye frekvencia tartományban ábrázolva

Ebben az esetben is felírtam a Fourier-soros közelítést. De csak a kilenctagú közelítést mutatom be a **4.22. ábrán**, ami sajnos a viszonylag sok tag ellenére is még elég rosszul írja le a mérési eredményeket.

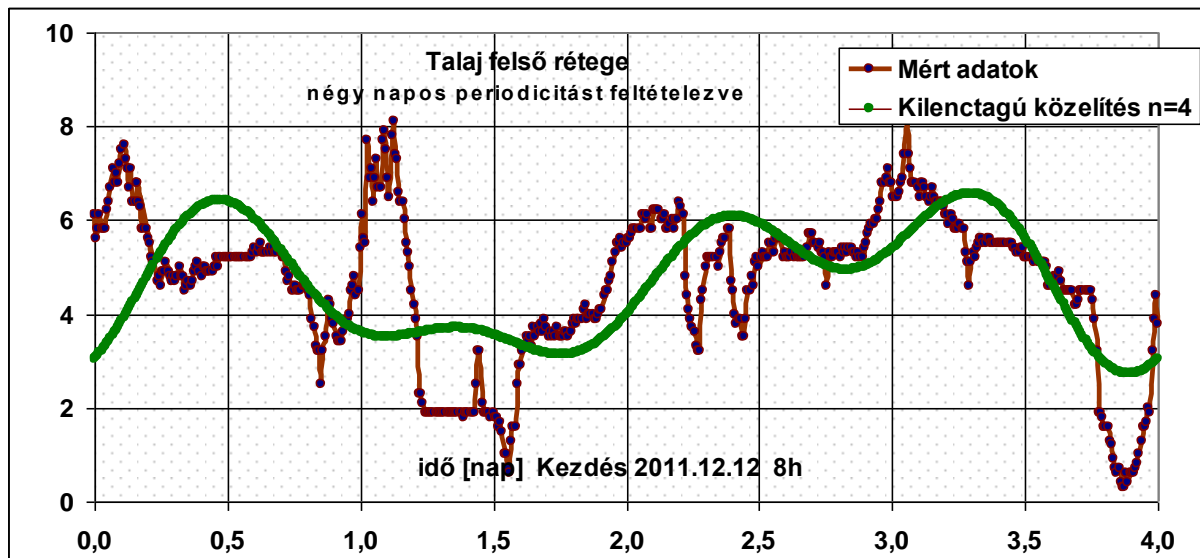


**4.22. ábra** Téli nap hőfokfüggvénye közelítve a

$$f(t) \cong 4,69 + 0,536 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) + 0,582 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) + 0,245 \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) + 0,960 \cdot \sin\left(\frac{4 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) \\ + 0,117 \cdot \cos\left(\frac{6 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) + 0,557 \cdot \sin\left(\frac{6 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) + 0,109 \cdot \cos\left(\frac{8 \cdot \pi}{1} \cdot t\right) + 0,033 \cdot \sin\left(\frac{8 \cdot \pi}{1} \cdot t\right)$$

Az ábra azt mutatja, hogy a periodicitás és az értékek közelítése is pontatlan. Sokkal több tag figyelembe vétele szükséges a megfelelő közelítéshez.

Elkészítettem a Fourier- analízist azzal a feltételezéssel is, hogy a periódus idő nem egy nap, hanem négy nap. Az eredmény ebben az esetben sem lett jobb, a **4.23. ábrán** láthatjuk.



**4.23. ábra** Téli nap hőfokfüggvénye közelítve a

$$f(t) \cong 4,69 + 0,215 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{4} \cdot t\right) - 0,726 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{4} \cdot t\right) - 0,497 \cos\left(\frac{4 \cdot \pi}{4} \cdot t\right) + 0,784 \cdot \sin\left(\frac{4 \cdot \pi}{4} \cdot t\right) - 0,683 \cdot \cos\left(\frac{6 \cdot \pi}{4} \cdot t\right) + 0,156 \cdot \sin\left(\frac{6 \cdot \pi}{4} \cdot t\right) - 0,691 \cdot \cos\left(\frac{8 \cdot \pi}{4} \cdot t\right) + 0,595 \cdot \sin\left(\frac{8 \cdot \pi}{4} \cdot t\right)$$

Ebben a fejezetben a pillanatnyi (inkább percenkénti) mérési eredményeket vizsgáltam meg különböző szempontok szerint. Az építészeti tervezésben a közelítő, például méretezési számításokat átlag értékekkel végzik. A következőkben megvizsgáltam néhány átlagos értéket mind a zöld tetőre, mind a betontetőre vonatkozóan

#### 4.4. Az átlagolt hőmérséklet mérési eredmények értékelése

A hőmérsékleti átlag értékeket többféle módon lehet képezni. Például a meteorológiában egy napi átlag hőmérséklet 1901-től 1965-ig a magyarországi állomáshálózatban a napi háromszori észlelés volt jellemző, 07, 14, 21 órakor közép-európai idő (CET) szerint. A napi középhőmérsékletet nem csupán a három érték átlagaként, hanem a Meteorológiai Világszervezet (World Meteorological Organization, WMO) ajánlására a 21 órás adatot kétszeres súllyal figyelembe véve számítjuk ( $t_a = (t_{07} + t_{14} + 2 \cdot t_{21}) / 4$ ).

1966-tól az észlelések időpontja 07, 13, 19 órára változott. Az éjszakai 01 órás adatot pedig a termográfáról olvasták le. A napi középhőmérsékletet a négy adatátlagaként számoljuk ( $t_a = (t_{01} + t_{07} + t_{13} + t_{19}) / 4$ ), további részleteket az Országos Meteorológia Szolgálat honlapján találunk [57].

Csak érdekesség képen kiszámítottam az általam mért adatokból a levegő hőmérsékletének átlagát különböző módokon, amit a **4.1. táblázatban** találunk. Az első oszlopban az összes adat átlaga, a másodikban az 1966 előtti a harmadikban az 1966 utáni átlagolással. Az eltérés az 1° C-t is meghaladja egyes esetekben.

#### 4.1. táblázat A levegő hőmérsékletének mérési adatai különböző átlagolással C fokban

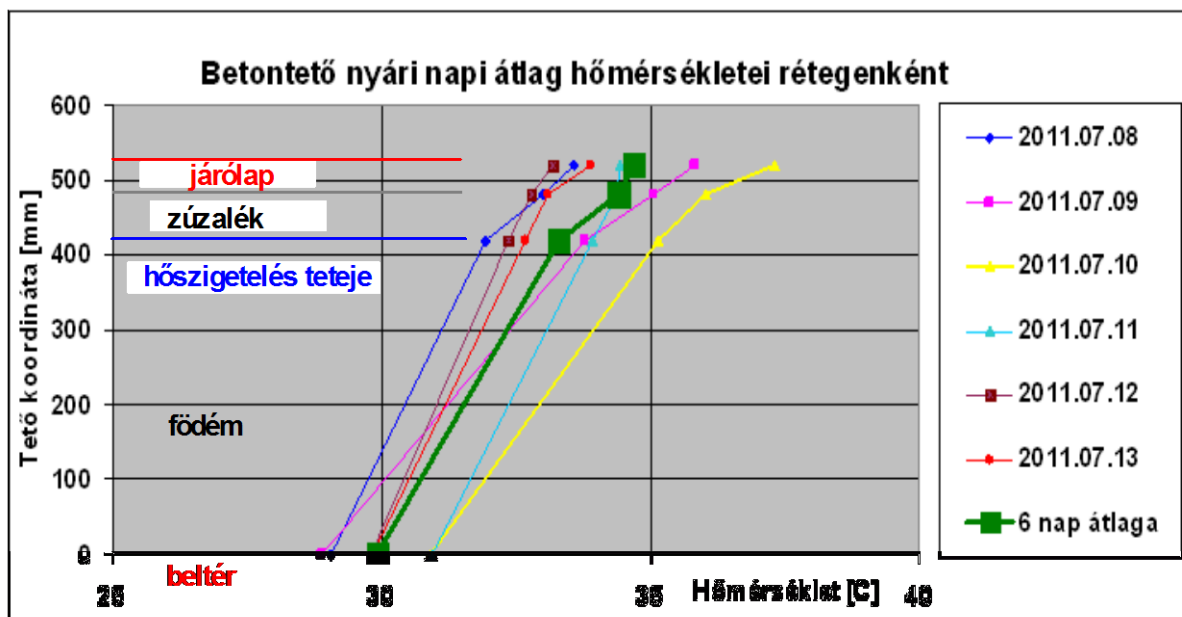
Dátum:	Minden mért adatból	Meteorológiai napi átlag levegő 1965 előtt	Meteorológiai napi átlag levegő 1965 után	Eltérés meteor.
2011.07.07	29,05	29,48	28,30	1,18
2011.07.08	31,33	31,55	30,48	1,08
2011.07.09	32,73	33,10	32,13	0,97
2011.07.10	28,93	28,05	28,85	-0,80
2011.07.11	27,99	27,88	27,43	0,45
2011.07.12.	29,46	29,78	29,15	0,63
Hat nap átlaga	29,91	29,78	29,15	1,18

(Megjegyzés: Érdekes, hogy a globális felmelegedés mérési adatainál tized fokokon vitatkoznak, amikor itt a 1966 előtti értékek mérési hibája is jóval nagyobb ennél, nem is beszélve az 1901 előtti adatokról. Ki tudja, mikor és mivel mérték a hőmérsékleteket?)

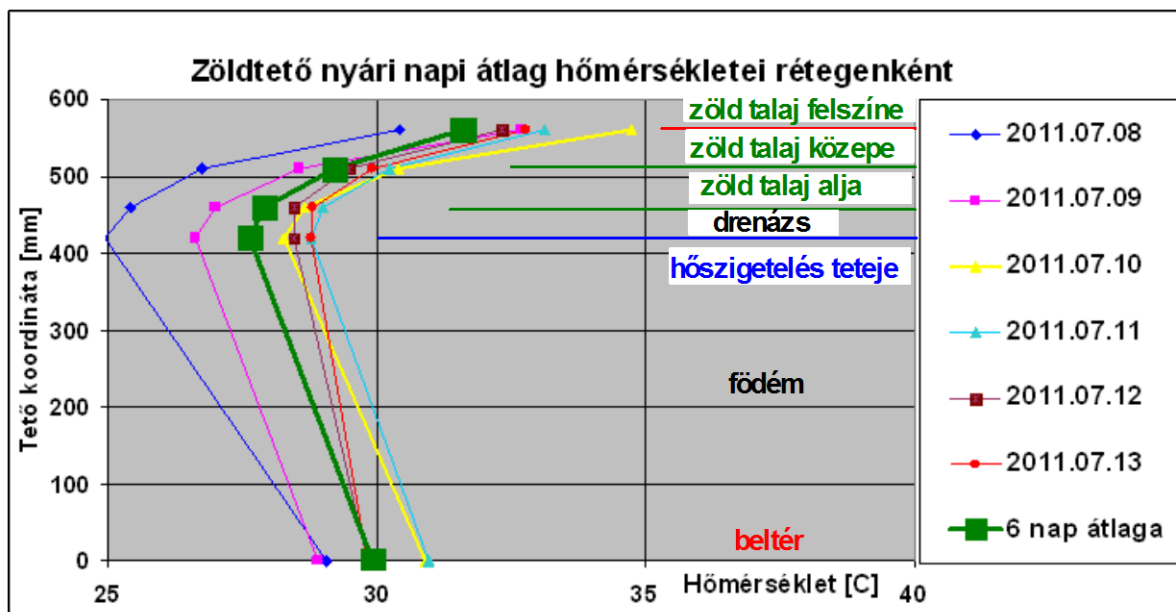
A mi mérésiértékelésünknel az átlag értékeken az adott időszakban mért összes adat átlagát fogjuk érteni. Ahol ettől eltértünk, azt az adott helyen jelzem.

#### 4.4.1. A betontető és a zöldsztető nyári napi hőmérséklet átlagainak alakulása az egyes réteghatárokon

A következő két ábrán (4.24. és 4.25. ábrák) igyekeztem azonos léptékben ábrázolni nyári hat napon keresztül a mérésekből számított napi átlagokat és a hat nap átlagát az egyes réteghatárokon. Az ábrázolás során a réteghatárokon mért hőmérsékleteket egyenes vonalakkal kötöttem össze. Ez egy közelítés, mert a valóságban a hőmérséklet eloszlás görbék szerint változik, Mivel a hőbevitel és a hővezetés a rétegekben nem stacionárius állapot. A **6.2. Tranziens megoldás véges differencia módszerével fejezetben** ezt be is mutatom egyszerű numerikus számítási eredményeken. Ott látható az eredményekből, hogy 10h nagyságrendű a hőáramlás késleltetése a fődémszerkezetben.



4.24. ábra A betontető nyári napi átlagos hőfokeloszlása



4.25. ábra A zöldtető nyári napi átlagos hőfokeloszlása

A födém beton szerkezete és a hőszigetelés és vízszigetelés egy réteggént jelenik meg az ábrákon. A pontosabb réteggrendet az 5.1. ábrán láthatjuk. A betontető kb. 60 mm-el vékonyabb. Hiányzik a drenázs réteg és a föld réteg, helyette van a zúzalék meg a járólapp melyek együttesen kb. 10 mm-el vékonyabb fedést adnak, mint a zöldtetős oldal. Az ábrákon szereplő „tető koordináta” a mennyezetről indul és a tetőn kifelé halad és mm-ben adja meg a mennyezettől mért távolságot.

Az időjárás alapvetően napos volt mind a hat napban. Az első három napban fokozatosan melegedett az idő, majd fokozatosan, kismértékben csökkent az átlaghőmérséklet.

A két tetőszerkezet hőmérséklet-eloszlása annyiban egyezik, hogy a beltér hőmérséklete gyakorlatilag egyforma a két tetőszerkezet alatt. Ez a szellőztetésnek köszönhető. A többi hőmérséklet azonban merőben különböző képet mutat.

A betontető esetében a beltéri hőmérséklethez képest az egész tetőszerkezet minden rétege átlagosan melegebb, míg a zöldtető esetében a hőszigetelő réteg teteje a legkisebb hőmérsékletű. A hőszigetelés felső hőmérséklete a napok előrehaladtával fokozatosan növekszik. Így korábban valószínű egy hidegebb időszak volt az időjárásban. Ezt a hidegebb hőmérsékletet őrizték meg a zöldtető belső rétegei.

A betontető esetében a hő kívülről befelé áramlik a helyiségbe a tetőn keresztül. Ezt mutatja a kifelé monoton növekvő hőmérséklet. Így hosszabb idő átlagában stacioner állapotot lehet feltételezni. A zöldtető esetében a hő belülről is és kívülről is a tetőszerkezet belseje felé áramlik. Ezért itt még hosszabb idő átlagában sem közelíthető egy szokványos stacioner hőtraszport folyamatnak a jelenséget. Elvégeztük az átlagolást hosszabb időre is, 13 napra és a zöldtető esetében maradt a tetőszerkezet belsejében a kisebb hőmérséklet. Bár egyre kisebb lett (1,6° C) lett a beltér és a hőszigetelés teteje közötti hőfokkülönbség. Hat nap esetén ez a különbség kb. 4° C.

#### 4.4.2. A betontető és a zöldtető téli napi hőmérséklet átlagainak alakulása az egyes réteghatárokon

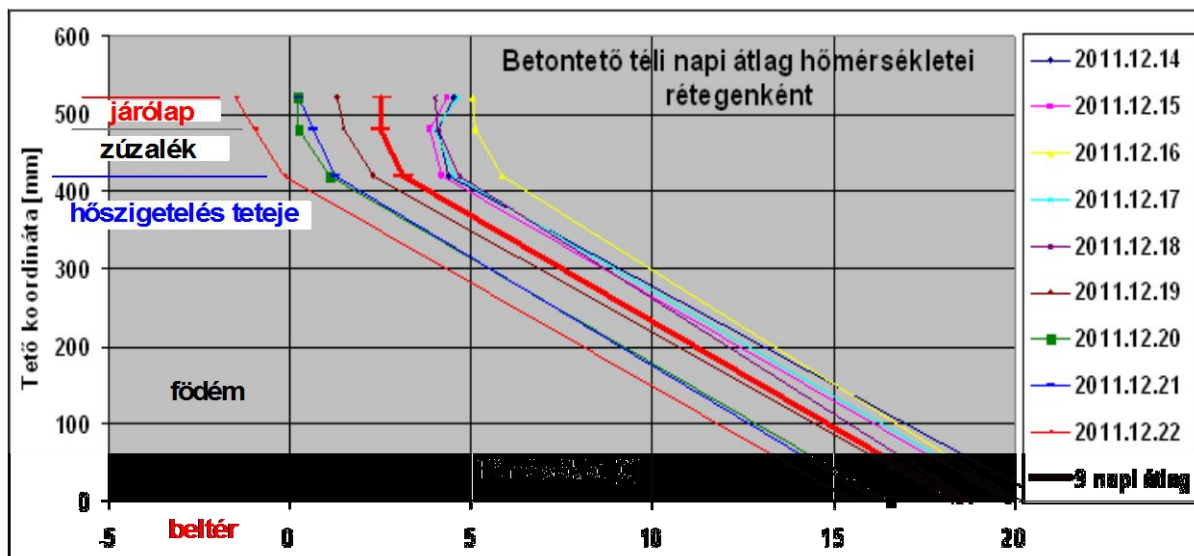
A következő két ábrán azonos léptékben ábrázoltuk téli kilenc napon keresztül a mérésekből



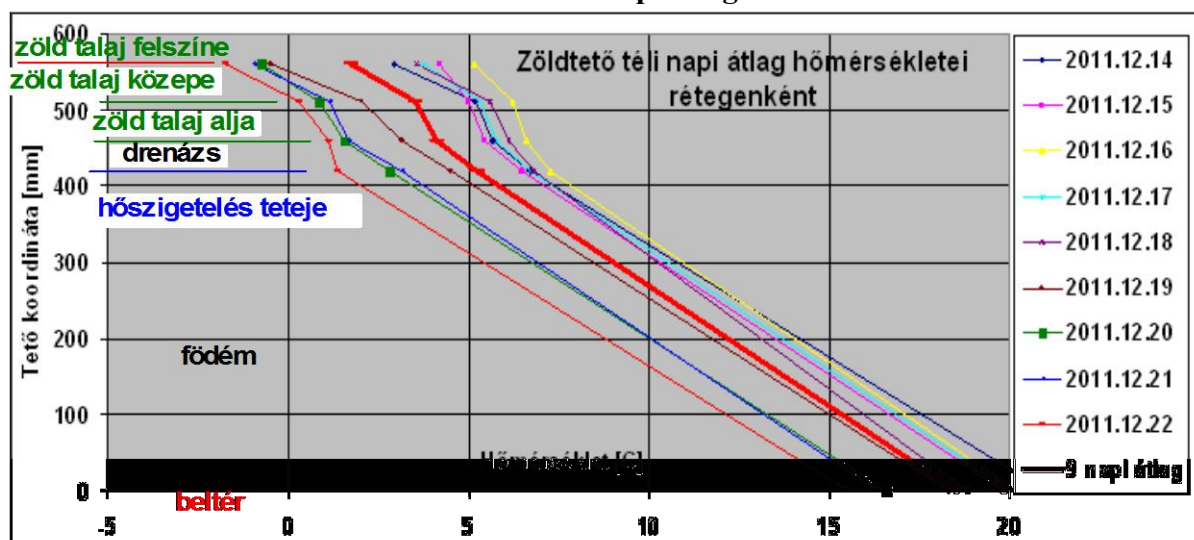
számított napi átlagokat és a kilenc nap átlagát az egyes réteghatárokon. A födém beton szerkezete és a hőszigetelés és vízszigetelés egy réteggként jelenik meg itt is az ábrákon.

Az időjárás alapvetően ködös felhős volt délben némi napsütéssel mind a kilenc napban. Az átlag hőmérséklet fokozatosan csökkent (ld. **4.12. ábra**). Ezen kívül a karácsony előtti óvoda leállás egy része is erre az időszakra esett. Csökkentették a fűtést az időszak végén. Mind a két tetőszerkezetnél egyértelmű a hőáramlás a helyiségekből a födémen keresztül a szabadba távozik a hő, ami termikus energiavesztésnek jelent. A beton tető felszín 1-2° C-al melegebb, mint a zöldtető felszíne. Ez a rosszabb hőszigetelésnek köszönhető. Mindkét tetőszerkezetnél akár egy napi átlagból is lehet közel stacioner hőáramlást számítani. A beltéri hőmérséklet csökkenésével mindkét tetőszerkezet folyamatosan hűl. A hőtárolás nem nagyon érvényesül a tetőszerkezetben. A hőmérséklet napi ingadozása kicsi, így a hőtehetetlenség nem érvényesül.

A betontető esetében jól látszik a felső rétegek rossz hőszigetelése. A hőmérséklet vonalak hajlásszöge közelebb kerül a függőlegeshez. A zöld tető taljának alsó rétegében is a függőlegeshez közelebb hajlanak a hőmérséklet vonalak, ami a rosszabb hőszigetelő képességre utal. Ebben a rétegben a talaj nedvességtartalma nagyobb, mint a felső rétegben. Ez a tendencia a nyári méréseknél is megmutatkozott.



4.26. ábra A betontető téli napi átlagos hőfokeloszlása



4.27. ábra A zöldtető téli napi átlagos hőfokeloszlása

## 4.5. Hővezetési tényező közelítő számítása a méréseim eredményeiből

A zöldtető talajának hővezetési tényezője a szakirodalom és saját tapasztalataink alapján is időben és térben is változik. A változás elsősorban a talajnedvesség változásának köszönhető. Mérőrendszerünkbe nem építettünk nedvességmérő egységeket, így ennek mérését csak időnként és tapasztalati úton ellenőriztük. Talaj pontos hővezetési tényezőjének mérésére sem vállalkoztunk. A talaj hővezetési tényezőjének mérési lehetőségeit már összefoglaltam a **3.5.1 Hővezetési tényező, számítása és mérése** fejezetben. Ez a feladat bonyolultabb és drágább műszerezettséget jelentett volna. A hőmérséklet mérési adatok alapján így is relatíve megbízható talaj hővezetési tényezőt lehetett meghatározni az előbb ismertetett hőmérsékletmérési adatokból.

### 4.5.1 A Hővezetési tényező meghatározása a téli hőmérséklet eloszlásokból

A számítás alapvető elve, hogy a kialakult közel stacioner réteghatárokon mért hőmérséklet értékekből visszaszámítsuk az egyes rétegek hővezetési tényezőjét.

A stacioner állapothoz csak a téli és bizonyos átmeneti időszak mérései állnak közel. Ezért a téli mérési állapot elemzéséből indulunk ki. A nyári állapotokban néha még a hőáram iránya is kérdéses. A tetőszerkezetbe sokszor kívülről is és belülről is befelé áramlik a hő, így ilyen számításra nem alkalmas.

Induljunk ki a **4.27. ábrán** látható téli zöldtető mérési adatokból. Az adatokat a **4.2. táblázatban** foglaltam össze. Az adatok alapján kiszámíthatjuk a napi átlag értékekből a tetőn eltávozó hőáram sűrűségét valamint a kilenc nap átlagában is kiszámíthatjuk azt.

Ha a jelenség stacioner, akkor fennáll, hogy minden rétegben azonos a hőáramsűrűség ( $\dot{q}$ ).

Így felírható, hogy a teljes födémbe és az egyes rétegekben a kialakuló hőáram-sűrűség egyenlő.

A teljes födémbe:

$$\dot{q} = \frac{\lambda_{föd}}{\delta_{föd}} \cdot (t_{bel} - t_{zöt}),$$

a födémbe, a lejt betonban és hőszigetelésben, mint egy rétegben  $\dot{q} = \frac{\lambda_{bet+szig}}{\delta_{bet+szig}} \cdot (t_{bel} - t_{szigt}),$

a drenázs rétegben  $\dot{q} = \frac{\lambda_{dre}}{\delta_{dre}} \cdot (t_{szigt} - t_{zöa}),$

a zöldtető talajának rétegében  $\dot{q} = \frac{\lambda_{zö}}{\delta_{zö}} \cdot (t_{zöt} - t_{zöa}).$

Ahol az egyes határokon lévő hőmérsékleteket jelölését a **4.2. táblázat** mutatja.

**4.2. táblázat** A réteghatár hőmérsékletek napi átlag értékei C fokban

2011.	dec. 14	dec.15	dec. 16	dec.17	dec. 18	dec. 19	dec. 20	dec. 21	dec.22	9 napi átlag
Beltér [0 mm] $t_{bel}$	20,96	19,85	20,19	20,05	18,83	18,30	16,54	16,31	15,53	18,51
Szigetelés teteje [420 mm] $t_{szigt}$	6,69	6,48	7,24	6,72	6,81	4,53	2,81	3,17	1,36	5,24
Zöld talaj alja [460 mm] $t_{zöa}$	5,67	5,44	6,60	5,78	6,12	3,16	1,54	1,67	1,12	4,12
Zöld talaj teteje [560 mm] $t_{zöt}$	2,92	4,17	5,16	3,74	3,57	-0,47	-0,75	-0,95	-1,76	1,74

A hővezetési tényezők és a rétegvastagságok jelölése pedig a következő:

$\lambda_{föd} \left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$  és  $\delta_{föd} [m]$  a teljes födém átlagos hővezetési tényezője és a teljes födém vastagsága.

$\lambda_{bet+szig} \left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$  és  $\delta_{bet+szig} [m]$  a körüreges beton+ a lejtbeton és a hőszigetelés átlagos hővezetési tényezője és födém vastagsága.

$\lambda_{dre} \left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$  és  $\delta_{dre} [m]$  a drenázs réteg hővezetési tényezője és vastagsága.

$\lambda_{zö} \left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$  és  $\delta_{zö} [m]$  a zöldtető talajának hővezetési tényezője és vastagsága.

A számítás során az ismertnek feltételeztük a körüreges beton, a lejtbeton és a hőszigetelés átlagos hővezetési tényezőjét. Itt a szakirodalomra támaszkodva adtuk meg az egyes rétegek jellemző hővezetési tényezőjét. Az adatsorokból a nagyobb hővezetési tényezőket vettük figyelembe, hiszen egy viszonylag öregebb tetőszerkezetről van szó, így a hőszigetelő képesség várhatóan már rosszabb az eredetileg beépített értékeknél. A három réteg együttes hővezetési tényezőjét  $\lambda_{bet+szig} = 0,153 \left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$  értéknek számítottam ki az **5.2. táblázat** adatainak felhasználásával. Ezt követően a többi réteg hővezetési tényezőjét a **4.2. táblázat** adataiból ki lehet számítani. Az eredményt a **4.3. táblázatban** foglaltam össze:

**4.3. táblázat** A számított hővezetési tényezők napi átlag értékei

2011.	dec.14	dec.15	dec. 16	dec.17	dec. 18	dec. 19	dec. 20	dec. 21	dec.22	9 napi átlag
$\lambda_{bet+szig}$	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
$\lambda_{dre} \left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$	0,30	0,27	0,43	0,30	0,36	0,21	0,23	0,19	0,20	0,25
$\lambda_{zö}$	0,28	0,56	0,47	0,35	0,25	0,20	0,32	0,27	0,26	0,29
$\dot{q} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$	-7,57	-7,09	-6,87	-7,07	-6,37	-7,30	-7,28	-6,97	-7,51	-7,04

A számított hővezetési tényező értékek megfelelnek a szakirodalomban található értékhatároknak. Mivel a téli állapotban a talaj nedvességtartalma általában nagyobb érték. Ezt többször ellenőriztük, és kb. 15-20% között mozgott a talaj nedvességtartalma. (Az extrém körülményektől eltekintve, pl. közvetlen eső vagy havazás után.)

## 4.6. Talajnedvesség mérése

A talajnedvesség mérésére számos módszer és eszköz létezik. Ezek tárgyalásának részleteibe nem kívánok belemenni.

### 4.6.1. A gravimetrikus talajnedvesség meghatározás

A talajból vett mintát (néhány dkg-nyi vagy kg-nyi mintát szárítószekrényes, tömegmérésen alapuló vizsgálati módszerrel mérjük. A nedves talajt tömegmérés után szárítószekrényben 105 fokon legalább 24 óráig szárítjuk, majd a minták száraz tömegét újra megmérjük.

A kapott nedvességkülönbség alapján a talaj nedvességtartalmát a száraz talaj tömegéhez viszonyított tömeg %-ban fejezzük ki:

$$N_{t\%} = \frac{G_n - G_{sz}}{G_{sz}} \cdot 100$$

ahol:  $N_{t\%}$  = nedvességtartalom tömeg %-ban,

$G_n$  = nedves talajminta tömege,

$G_{sz}$  = száraz talajminta tömege.

Az óvoda méréseink során bizonyos időjárási körülmények esetében végeztem talajnedvesség mérést. Ezek a körülmények téli nedves, csapadékos időben, tavaszi- őszi átmeneti időben és nyáron kifejezetten száraz időjárási körülmények között. Egy téli, nedves időben végzett mérés menetét és eredményeit mutatom be a következő alfejezetben.

### 4.6.2. Téli nedves (telített) talaj nedvességének mérése

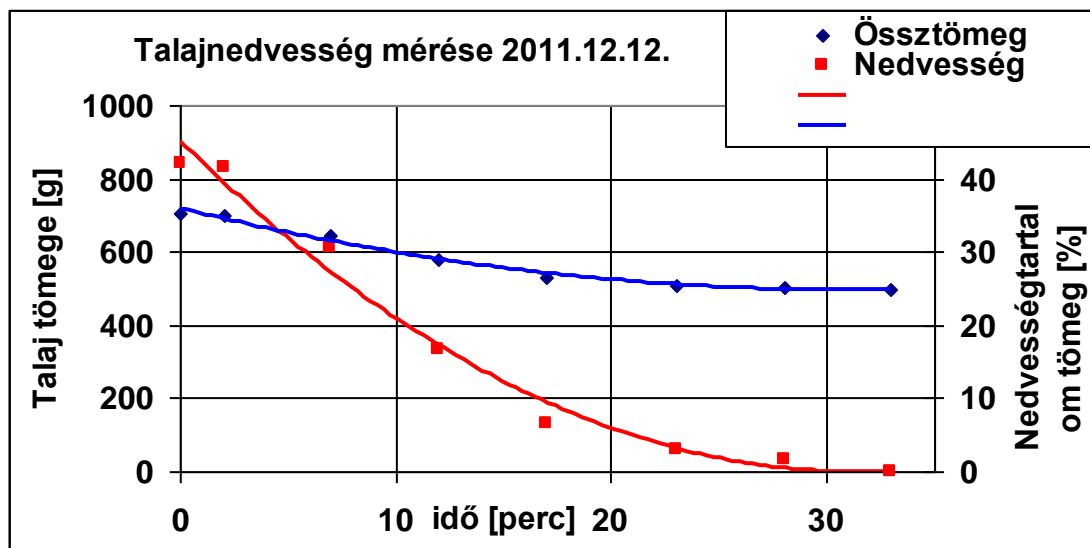
A mérést 2011. december 12-én végeztük. Előzőleg csapadékos, de nem fagyos időjárás uralkodott.

A zöldtető talajából vett mintát kb. 0,5 kg-nyit gyűjtöttünk a zöld tető egy átlagos részéről. Megtisztítottam a nagyobb növényi maradványoktól. A talajminta fényképe a **4.28. ábrán** látható.



4.28. ábra A nedves talajminta tömörítés nélkül

A talajminta térfogatát (tömörítetlen) és tömegét megmértem mérőedényben és 0.1 g pontosságú konyhai mérlegen. Ezt követően a talajt mikrohullámú sütőben szárítottam. A szárítás folyamata során feljegyeztem az idő függvényében a száradó minta tömegének változását. Az eredményeket diagramban ábrázoltam.



4.29. ábra A nedves talajminta tömörítés nélkül

A teljesen nedves talaj 703 g tömegű volt a teljesen kiszáradt talaj pedig 495 g tömegű.



**4.30. ábra A teljesen száraz talajminta tömörítés nélkül**

A térfogatmérésnél a talajt nem tömörítettem össze sem a nedves, sem a kiszáritott állapotban. A nedves talaj térfogata  $700 \text{ cm}^3$  térfogatú volt, a kiszáritott talaj pedig  $510 \text{ cm}^3$  térfogatúra zsugorodott.

A tetőszerkezetben lévő talaj térfogata kb. a száraz talaj térfogatának felelt meg. Olyan mértékben volt kb. összetömörítve.

A talaj sűrűségét a kiindulási tömeggel és a végső térfogattal számolva.

$$\rho_{nedv.} = \frac{G_n}{V_{sz}} = \frac{703}{510} = 1,37 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{száraz} = \frac{G_{sz.}}{V_{sz}} = \frac{495}{480} = 0,97 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

A talaj sűrűsének számításában van némi bizonytalanság, éppen a tömörítés mértéke miatt.

Az átmeneti állapotokban tavasszal és ősszel a talaj nedvessége kb. 8% és 32% között változott, az időjárástól függően.

A nyári talajmintáknál a felszín közeléből vett minta 2-3% nedvességtartalmú volt. Az alsóbb rétegből vett minták viszont 5-20% nedvességtartalommal is rendelkeztek. Ez is nagymértékben attól függött, hogy a mintavétel előtt milyen időjárás uralkodott. Ennek alapján elég nehéz volt eldönteni, hogy adott számítási modellben milyen nedvességtartalommal, illetve milyen egyéb hőtechnikai jellemzőkkel számoljak. Amelyek némiképp függenek a talaj nedvességétől. A számításokban így többségében átlagos értékekkel számoltam.

## 5. A tetőszerkezet hőtechnikai számítása

A dolgozat elején már tárgyaltam különböző hőtechnikai fogalmakat. A pontos matematikai modell egyes részleteit most kívánom összefoglalni tanulmányaim és a szakirodalom alapján.

### 5.1. A hőtechnikai számítás matematikai modellje

A következő fejezetekben alkalmazott matematikai modellben a födém belsejében a hővezetéssel foglalkozom. Természetesen a födém hőfelvétele és hőleadása sugárzással és hőátadással is történik. Ezeknek a hőtranszport jelenségeknek a hatása a födém peremhőmérsékletében jelentkeznek. A mérésekkel és a számításokkal a födémekben lejátszódó hővezetés és hőtárolás folyamatait mértem illetve modelleztem.

A hővezetés (vagy kondukciónak is nevezik) az energiacsere azon formája, amikor a hőmérsékletkülönbség hatására energia jut el az anyag melegebb (magasabb hőmérsékletű) részeiből a hidegebb (alacsonyabb hőmérsékletű) részekre anélkül, hogy az anyagi részecskék az egymáshoz képest elfoglalt helyzetüket megváltoztatnák. E feltétel miatt tiszta hővezetésről általában csak szilárd testekben beszélhetünk, mert az anyagi részecskék a hőmérsékletkülönbség hatására normális körülmények között folyékony és légnemű anyagban helyükről elmozdulnak. Persze a más energiaátadási módok mellett a laminárisan áramló folyadékokban vagy nyugvó folyadékokban és nyugvó gázokban is létezik vezetési energiátadás. Fourier szerint a vezetési (konduktív) hőáramsűrűsége  $[W/m^2]$  a hőmérséklet-gradienssel arányos:

$$\underline{\dot{q}} = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad 5.1$$

ahol az arányossági tényező, a  $\lambda [W/(mK)]$  hővezetési tényező, anyagtól és hőmérséklettől függő érték. A hőáram-sűrűség vektor a negatív irányba mutat, azaz a csökkenő hőmérséklet irányába. Ezt jelzi az egyenletben a negatív előjel. Állandó nyomáson a szilárd test térfogategységének időbeli entalpiaváltozása a következő formulával írható le

$$\frac{\partial(\rho \cdot c \cdot T)}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) + G_h \quad 5.2$$

ahol az egyenlet bal oldala a térfogategység belső energiájának időbeli változása, a jobb oldalának első tagja a vezetéssel végbement energiacsere mértéke, második tagja a forrás/nyelő által keletkezett/elnyelt entalpia mértéke. Az egyenletben szereplő „ $\rho$ ” az anyag sűrűsége  $[kg/m^3]$ , „ $c$ ” a fajhő állandó nyomáson  $[J/(kgK)]$ , amelyeket az egyszerűség kedvéért a hőmérséklettől függetlennek veszünk,  $G_h$  a belső hőforrás  $[W/m^3]$ . Tekintsünk el a belső hőforrástól. (Ha lenne belső hőforrás, akkor ez a födém hűtése vagy fűtése lenne a mi esetünkben.) A „ $\lambda$ ” hővezetési tényező hőmérséklettől függetlennek tekinthető, ekkor mint egy állandót a differenciálás jele elé kivehetjük.

Ezeket felhasználva és átrendezve az egyenletet kapjuk, hogy:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \text{div}(\text{grad } T) \quad 5.3$$

A divgrad operátor a Laplace operátor, valamint

$$a = \frac{\lambda \cdot \left[ \frac{J}{s \cdot m \cdot K} \right]}{\rho \cdot c \cdot \left[ \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{J}{kg \cdot K} \right]} = \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$

a hőfokvezetési tényező, így az egyenletünk

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \Delta T \quad 5.4$$

Az egyenletet felírhatjuk x,y,z koordináta rendszerben

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad 5.5$$

### 5.1.1. A megoldás feltételei

Az 5.5 egyenlet a hőmérséklettér időbeli változását írja le. Az egyenletet egyszerű módszerekkel a legtöbb gyakorlati esetben nehéz megoldani. Analitikai megoldása még akkor is meglehetősen nehézkes, amikor a rendszer forrásmentes, hiszen végül is négy független változót (a három helykoordináta és az idő) tartalmazó parciális differenciálegyenlet megoldásáról van szó. Sok esetben a hővezetési problémák szimmetriával rendelkeznek. A szimmetria miatt a független változók száma csökkenthető. Más esetekben viszont bonyolódik a helyzet, ha a  $\lambda$  hővezetési tényező és a  $\rho$  sűrűség értékét nem tekinthetjük mindig állandónak, hiszen ezek hőmérséklet-függése közismert. Ilyen esetekben az analitikus megoldás már lehetetlen, de természetesen numerikus számítással a probléma megoldható.

Az 5.5 differenciálegyenlet egy általános leírást ad, az egyes esetekre történő megoldásnál az egyértelműség miatt a megoldáshoz felhasznált valamennyi matematikai leírást meg kell adni. Ezek az egyértelműségi feltételek:

- a geometriai feltételek,
- a fizikai feltételek,
- a határfeltételek (peremfeltételek) és
- a kezdeti feltételek.

A hővezetés differenciálegyenletet zárt peremfeltételi rendszerrel lehet megoldani. Úgynevezett elliptikus típusú parciális differenciálegyenlet megoldásainál az alábbi peremfeltételeket alkalmazzák [40], [42], [56], [77],:

#### Elsőfajú peremfeltétel

Minden időpontban ismerjük a test felületén a hőmérséklet-eloszlást (csak a felületen ismerjük, nem a tér minden pontján):

$$T_w = f(x, y, z, t) \quad 5.6$$

ahol  $T_w$  a test felületi hőmérséklete [K], x, y, z a felületi helykoordináták [m], „t” az idő [s].

#### Másodfajú peremfeltétel

Minden időpontban ismert a test felületén a hőáram-sűrűség eloszlás:

$$q_w = f(x, y, z, t)$$

ahol  $q_w$  test felületén egy adott pontban a hőáram-sűrűség [W/m<sup>2</sup>].

#### Harmadfajú peremfeltétel

Ismert a test felületén a konvekciós hőcsere mértéke, amit a Newton-féle hőátadási törvény



alapján az alábbi végső formában adnak meg:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_w = -\frac{\alpha}{\lambda} \cdot (T_w - T_f)$$

ahol az egyenlet bal oldala a hőmérsékleti görbének a test felületén a felület normálisával alkotott hajlásszöge, az „ $\alpha$ ” a hőátadási tényező a test felülete és a környezet között [W/(m<sup>2</sup>K)], a „ $\lambda$ ” a hővezetési tényező a testen belül [W/(m K)],  $T_f$  a testet körülvevő közeg (fluidum) hőmérséklete [K],  $T_w$  a testet felületének hőmérséklete [K].

A peremfeltétel értelmében a test egységnyi felületéről időegység alatt távozó hőmennyiség megegyezik a test belsejéből hővezetéssel áramló hő mennyiségével. A hőmérsékleti görbe felületi meredekségét megadó  $\alpha/\lambda$  hányadost relatív hőátadási tényezőnek nevezik [1/m], amely független a felület alakjától. Lásd részletesebben [42].

### Negyedfajú peremfeltétel

Negyedfajú peremfeltételről akkor beszélünk, amikor a test és a környezete közötti energiacsere hővezetés útján megy végbe, feltételezve azt, hogy az érintkező felületek hőmérséklete az adott pontban azonos (ideális érintkezés):

$$\lambda_1 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_0 = \lambda_2 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_0$$

## 5.2. A zöldtető téli stacioner hőtechnikai számítása

### 5.2.1 Csak hővezetéssel terjedő hő számítása

Stacioner megoldásnál az 5.5 egyenletben  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$  feltétel teljesül, a megmaradt egyenlet

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad 5.7$$

alakra egyszerűsödik.

Viszonylag nagyméretű sík falszerkezetek esetén az 5.7 egyenlet tovább egyszerűsíthető, mert a hőmérséklet változás csak a falszerkezetre merőleges koordináta mentén változik, a másik két irányban nem. Födém esetében ez a födémre merőleges függőleges „z” koordináta

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad 5.8$$

Többrétegű födém esetében ez a megoldás jól ismert példája az építészeti gyakorlatnak. Oldjuk meg az 5.8 differenciálegyenletet az **5.1. ábrán** látható ötrétegű zöldtető födém szerkezetre. Egyszerűség kedvéért feltételezzük, hogy a födém alján és a födém tetején (ültető közeg tetején) ismerjük a hőmérsékleteket a mérési adatainkból, amit az **5.1. táblázat** tartalmaz.

$$T_{me} = 20,05^0 C ; t_{fel} = 3,74^0 C$$

Egy rétegen belül nem változik a hővezetési tényező, így az 5.8 egyenlet egy-egy szakaszon megoldható. Kétszer integrálva az egyenletet, egy egyenes egyenletét kapjuk minden egyes

rétegben.

A hőmérséklet jelölésében ennél a megoldásnál áttérünk a nagy  $T$  jelölésről a gyakorlatban szokásosabb  $t$  jelölésre, ez azért is indokolt, mert a °C-ban mért hőmérsékletek szokásosabb jelölése.

Legyen az első rétegben a megoldás

$$t = A_1 \cdot z + B_1 \quad 5.9$$

Ugyan ilyen alakú a megoldás a többi rétegben is. Rendre az egyes rétegekben:

$$\begin{aligned} t &= A_2 \cdot z + B_2 \\ t &= A_3 \cdot z + B_3 \\ t &= A_4 \cdot z + B_4 \\ t &= A_5 \cdot z + B_5 \end{aligned} \quad 5.10$$

A megoldás függvényekben szereplő tíz db. állandót a peremfeltételekből és egyéb egyenletekből kell meghatározni. Az első és az ötödik réteg peremén az **5.1. táblázatból** kivett két (mennyezeti és felszíni) hőmérséklet adott. A többi helyen az a feltétel, hogy csatlakozzanak a réteghatárokon a hőmérsékleti függvények. Az egyértelmű megoldáshoz további egyenletek szükségesek.

Írjuk fel további egyenletekként, hogy a hőáram-sűrűség minden rétegben azonos.

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \lambda_{fp} \cdot \frac{t_{12} - t_{me}}{\delta_{fp}}; \quad \dot{q} = \lambda_{lb} \cdot \frac{t_{23} - t_{12}}{\delta_{lb}}; \quad \dot{q} = \lambda_{h\ddot{o}} \cdot \frac{t_{34} - t_{23}}{\delta_{h\ddot{o}}}; \quad \dot{q} = \lambda_{dr} \cdot \frac{t_{45} - t_{34}}{\delta_{dr}}; \\ \dot{q} &= \lambda_{ta} \cdot \frac{t_{fel} - t_{45}}{\delta_{ta}} \end{aligned} \quad 5.11$$

Ezekből az egyenletekből kifejezhetők a hőmérsékletkülönbségek, ha  $\frac{\lambda}{\delta}$  értékekkel osztunk.

Ezután összeadva az egyenleteket megkapjuk a hőáramsűrűséget:

$$\dot{q} = \frac{I}{\frac{\delta_{fp}}{\lambda_{fp}} + \frac{\delta_{le}}{\lambda_{le}} + \frac{\delta_{h\ddot{o}}}{\lambda_{h\ddot{o}}} + \frac{\delta_{dr}}{\lambda_{dr}} + \frac{\delta_{ta}}{\lambda_{ta}}} \cdot (t_{fel} - t_{me}) \quad 5.12$$

Az ismert hőáramsűrűséget visszahelyettesítve az 5.11 egyenletekbe megkapjuk a hőmérsékleteket a réteghatárokon.

$$\begin{aligned} t_{12} &= t_{me} + \frac{\dot{q}}{\lambda_{fp}} \cdot \delta_{fp}; & t_{23} &= t_{12} + \frac{\dot{q}}{\lambda_{lb}} \cdot \delta_{lb}; & t_{34} &= t_{23} + \frac{\dot{q}}{\lambda_{h\ddot{o}}} \cdot \delta_{h\ddot{o}}; \\ t_{45} &= t_{34} + \frac{\dot{q}}{\lambda_{dr}} \cdot \delta_{dr} \end{aligned} \quad 5.13$$

Az utolsó egyenlet már csak egy ellenőrzést ad, hogy jól számoltunk-e.

$$t_{fel} = t_{45} + \frac{\dot{q}}{\lambda_{tal}} \cdot \delta_{tal} \quad 5.14$$

Az 5.11 egyenletrendszer nem lineárisan független egymástól, így elhagyható a megoldáshoz.

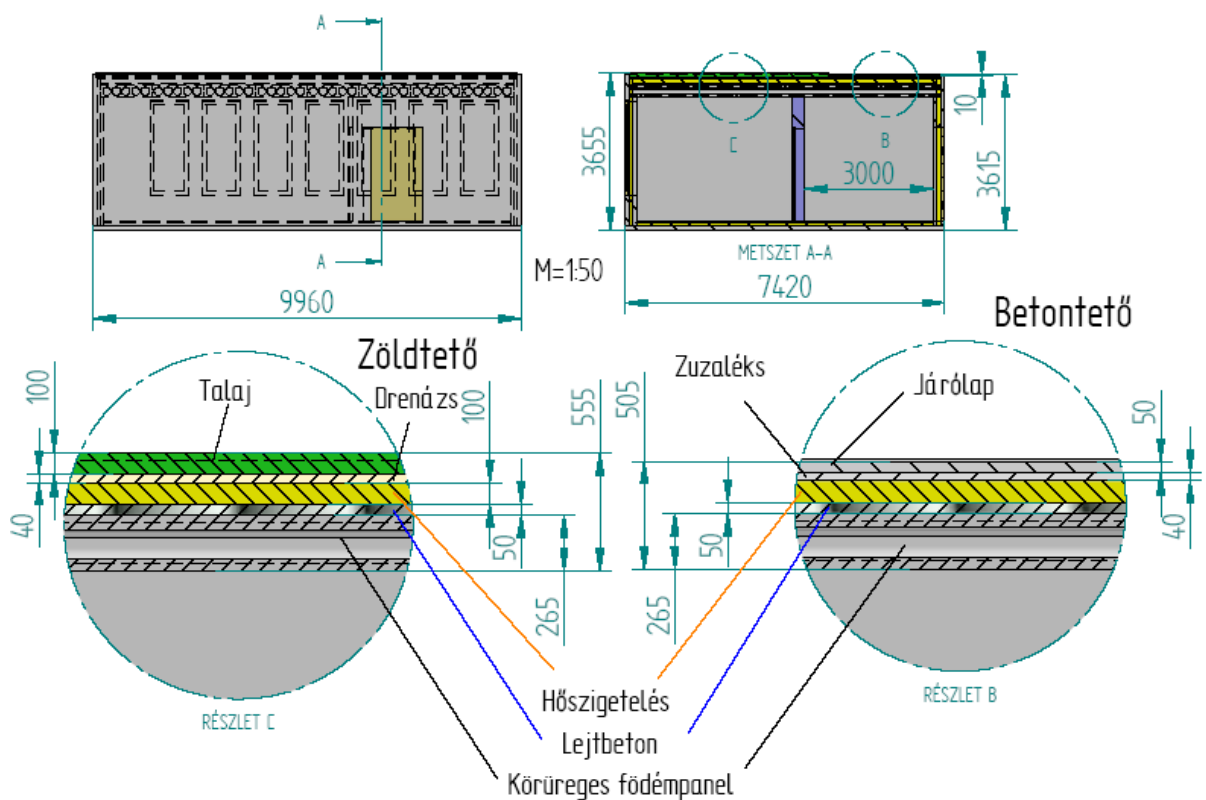
Az *5.9 és 5.10 egyenletekben* szereplő együtthatók ezt követően már könnyen kiszámíthatók. Ennek részleteivel az olvasót nem terhelem. A végső megoldás grafikonját az **5.2. ábra** szemlélteti.

### 5.2.2. Hőátbocsátás számítása

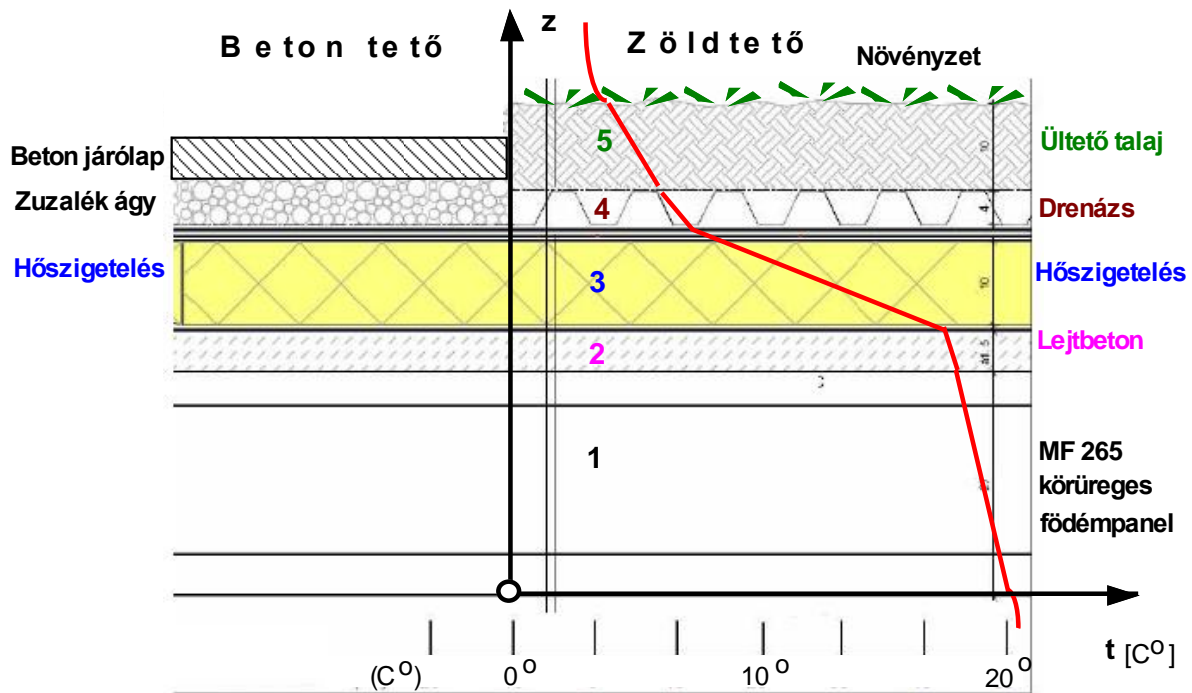
Az építészeti gyakorlatban nem csak a hővezetéssel terjedő hőtraszportot, hanem a hőátadással terjedő hőt is számításba kell venni. A következő megoldás nagyon hasonló a most közölt differenciálegyenlet megoldásához. A különbség annyi, hogy a hőátadással érkező és távozó hőt is figyelembe vesszük.

A megoldást az óvoda födémjén mutatjuk be egy téli mérésorozat eredményeivel. A korábbi mérési adatok és egyéb hőtechnikai táblázatok felhasználásával számításokkal is követtük a tetőszerkezetben lejátszódó hőtani folyamatokat. Ebben a fejezetben elsőként az építészetben szokásos stacioner hőveszteség és hőnyereség számításokat végzem el. Egy korábbi, közelítő számítás eredményét már bemutattam a **4.2. ábrán**.

A számítás részleteinek megértése érdekében készítettem egy egyszerűsített makettet az óvoda azon részéről, ahol a méréseket is végeztük. Az egyik felén a betontető a másik oldalon a zöldtetőfedéssel. A főbb geometriai méreteket és a kétféle tető rétegendjét az **5.1. ábra** mutatja. Nem jeleztük a vékonyabb vízszigetelő és egyéb elválasztó rétegeket az ábrán, illetve azokkal a későbbiekben sem számoltunk külön. Tehát a peremfeltételek ismertek.



**5.1. ábra** Az óvoda tetőszerkezete



5.2. ábra Hőfoklefutás a zöldtető szerkezetében téli állapotban

Végezzünk el egy hőtechnikai számítást egy téli állapottal, mivel az áll közel a stacioner állapothoz. Ezen belül is válasszuk ki a 2011.12.17. állapotot a zöldtetőre vonatkozóan. A mért hőmérsékleteket az 5.1. táblázatban találjuk.

5.1. táblázat mért és számított hőmérsékletek a zöldtetőben télen

	beltér	mennyezet	lejt beton alja	hőszigetelés alja	drenázs alja	talaj alja	talaj teteje	külső levegő
	$t_{be}$	$t_{me}$	$t_{12}$	$t_{23}$	$t_{34}$	$t_{45}$	$t_{fel}$	$t_{kül}$
mérés	20,5	20,05			6,72	5,78	3,74	3,2
számítás	20,5	20,04	19,13	18,95	7,51	5,68	3,39	3,20

**Megjegyzés:** A talaj és a drenázs hővezetési tényezőjét mérési adatokból (9 nap átlagából) számítottuk ki, itt viszont egy nap átlag hőmérsékleteit használtuk a számításban. Ez az oka a mért és a számított adatok kis eltéréseinek.)

Stacioner hőáramlást feltételezve a födémén keresztül létrejövő hőáramsűrűséget az építészetben széles körben alkalmazott hőátbocsátási tényezővel (U) általánosan felírva.

$$\dot{q} = U \cdot (t_{be} - t_{kül}) \quad [W / m^2] \quad 5.15$$

Stacioner hőáramlást feltételezve minden rétegben ugyanakkora hőáramsűrűség jön létre, így minden rétegre felírható az egyenlet.

$$\text{Felírva a belső tér és a mennyezet között} \quad \dot{q} = \alpha_b \cdot (t_{be} - t_{me}) \quad [W / m^2] ; \quad 5.16$$

$$\text{majd a födémpanelre} \quad \dot{q} = \frac{\lambda_{fp}}{\delta_{fp}} \cdot (t_{me} - t_{12}) \quad [W / m^2] ; \quad 5.17$$

$$\text{a lejtbetonra} \quad \dot{q} = \frac{\lambda_{le}}{\delta_{le}} \cdot (t_{12} - t_{23}) \text{ [W / m}^2 \text{ ]}; \quad 5.18$$

$$\text{a hőszigetelésre} \quad \dot{q} = \frac{\lambda_{hő}}{\delta_{hő}} \cdot (t_{23} - t_{34}) \text{ [W / m}^2 \text{ ]}; \quad 5.19$$

$$\text{a drenázsra} \quad \dot{q} = \frac{\lambda_{dr}}{\delta_{dr}} \cdot (t_{34} - t_{45}) \text{ [W / m}^2 \text{ ]}; \quad 5.20$$

$$\text{a talajra} \quad \dot{q} = \frac{\lambda_{ta}}{\delta_{ta}} \cdot (t_{45} - t_{fel}) \text{ [W / m}^2 \text{ ]}; \quad 5.21$$

és végül a külső levegő és a talaj közötti hőátadásra

$$\dot{q} = \alpha_k \cdot (t_{fel} - t_{kül}) \text{ [W / m}^2 \text{ ]}. \quad 5.22$$

Ezekből az egyenletekből kifejezhetők a hőmérséklet különbségek, ha  $\frac{\lambda}{\delta}$  értékekkel és az alfákkal osztunk. Ezután összeadva az egyenleteket megkapjuk a hőátbocsátási tényezőt (U).

$$U_{zöld} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_b} + \frac{\delta_{fp}}{\lambda_{fp}} + \frac{\delta_{le}}{\lambda_{le}} + \frac{\delta_{hő}}{\lambda_{hő}} + \frac{\delta_{dr}}{\lambda_{dr}} + \frac{\delta_{ta}}{\lambda_{ta}} + \frac{1}{\alpha_k}}. \quad 5.23$$

A szokásos építőanyagokra érvényes értékeket felvéve az **5.2 táblázatból**

## 5.2. táblázat A rétegek anyagjellemzői

Sor	Réteg	Hőátadási tényező $\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	Rétegvastagság $\delta$ [m]	Hővezetési tényező $\lambda$ [W/mK]	Hőellenállás $R = \frac{\delta}{\lambda}; R = \frac{1}{\alpha}$ R[m <sup>2</sup> K/W]
be	belső hőátadás	8	–	–	0,125
1	födémpanel	–	0,27	1,45	0,1862
2	lejtbeton	–	0,05	1,5	0,0333
3	hőszigetelés	–	0,1	0,06	1,666
4	drenázs	-	0,04	0,25	0,16
5	talaj (száraz)	-	0,1	0,3	0,333
kül	külső hőátadás	24	–	–	0,0417

$$U_{zöldtető} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,27}{1,45} + \frac{0,05}{1,5} + \frac{0,1}{0,06} + \frac{0,04}{0,25} + \frac{0,1}{0,3} + \frac{1}{24}} = 0,396 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad 5.24$$

Így a hőáram-sűrűség kiszámítható a belső és a külső hőmérséklet segítségével az 5.15 egyenlet alapján.

$$\dot{q}_{zöld} = U \cdot (t_{be} - t_{kii}) = 0,396 \cdot (20,5 - 3,2) = 6,86 \left[ \frac{W}{m^2} \right]. \quad 5.25$$

Ezt követően ki tudjuk számítani az egyes rétegek határain a hőmérsékleteket az egyes rétegekre felírt egyenletekkel. Az eredményt az **5.1. táblázat** számítás sorában tüntettük fel, valamint az **5.2. ábrán** az egyes rétegekben piros vonallal be is rajzoltuk a hőfokfüggvényt. Az **5.1. táblázat** adatai szerint a számított és a mért hőmérsékletek egészen jó egyezést mutatnak.

Nézzük meg, hogy a két tetőszerkezet hogyan felelne meg a mai építészeti előírásoknak? Ehhez vegyük elő az 7/2006 TMN rendelet előírásait. Az **5.3. táblázatban** láthatjuk az

adatokat. Eszerint lapos tető esetén  $U_{max.} = 0,25 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ . A zöldtető  $U_{zöldtető} = 0,396$

értéke elmarad a mai előírásoktól. Az eltérés kb. 60 %-os. A betontető  $U_{betontető} = 0,475$  értéke jobban elmarad az előírástól. Az eltérés kb. 90 %-os.

Az óvoda zöldtetőjének kialakítása jóval a 2006-os rendelet megjelenése előtt történt. Az akkori előírásoknak a zöldtető megfelelt. A betontető már kicsit túllépi a megengedette. De ennek az öregedés lehet az oka. (Számításokban nagyobb hővezetési tényezőket vettünk figyelembe, mint az új szerkezeteknél.)

Történelmi áttekintés szempontjából nézzünk egy korábbi előírást, például az **1986. márc. 15. - MSZ-04-140/2-85 ÉPÍTÉSÜGYI ÁGAZATI SZABVÁNY. Épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai. Hőtechnikai méretezés.**

3.2.1. A téli hőveszteség korlátozása érdekében az állandó jellegű, egész télen át fűtött, 16 °C vagy annál magasabb belső hőmérsékletű,  $\varphi_{iz}=75\%$  vagy annál kisebb relatív nedvességtartalmú épületek illetve helyiségek:

külső falaira:  $k_f = 0,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

tető, ill. padlásfödémekre:  $k_f = 0,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

ablakaira és erkélyajtóira:  $k_f = 3,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

a hőátbocsátási tényező követelményértéke (hőhidak kivételével).

Forrás: <http://www.knaufinsulation.hu/h-technika-t-rt-neti-ttekint-s>

Ennek az előírásnak az óvoda zöld tető szerkezete megfelelt.

A most hatályos szabványnak azonban már, mint előbb láttuk, nem felel meg.

**7/2006. (V. 24.) TNM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról I. melléklet**

Ma is érvényben lévő szabvány, a hőtechnikai számítások módjáról.

### 5.3. táblázat Épülethatároló szerkezetek hőátbocsátási tényezőinek minimum követelményei

Épülethatároló szerkezet	A hőátbocsátási tényező követelményértéke $U[\text{W/m}^2\text{K}]$
Külső fal	0,45
Lapostető	0,25
Padlásfödém	0,30
Fűtött tetőteret határoló szerkezetek	0,25
Alsó zárófödém árkád felett	0,25
Alsó zárófödém fűtetlen pince felett	0,50
Homlokzati üvegezett nyílászáró (fa vagy PVC keretszerkezettel)	1,60
Homlokzati üvegezett nyílászáró (fém keretszerkezettel)	2,00
Homlokzati üvegezett nyílászáró, ha névleges felülete kisebb, mint $0,5 \text{ m}^2$	2,50
Homlokzati üvegfal <sup>2)</sup>	1,50

Tetőfelülvilágító	2,50
Tetőszík ablak	1,70
Homlokzati üvegezetlen kapu	3,00
Homlokzati vagy fűtött és fűtetlen terek közötti ajtó	1,80
Fűtött és fűtetlen terek közötti fal	0,50
Szomszédos fűtött épületek közötti fal	1,50
Talajjal érintkező fal 0 és 1 m között	0,45
Talajon fekvő padló a kerület mentén 1,5 m széles sávban (a lábazon elhelyezett azonos ellenállású hőszigeteléssel helyettesíthető)	0,50

1) A követelményérték határolószervezetek esetében „rétegtervi hőátbocsátási tényező”, amin az adott épülethatároló szerkezet *átlagos* hőátbocsátási tényezője értendő: ha tehát a szerkezet vagy annak egy része több anyagból összetett (pl. váz- vagy rögzítőelemekkel megszakított hőszigetelés, pontszerű hőhidak stb.), akkor ezek hatását is tartalmazza. A nyílászáró szerkezetek esetében a keretszerkezet, üvegezés, távtartói stb. hatását is tartalmazó hőátbocsátási tényezőt kell figyelembe venni. A csekély számszerű eltérésre tekintettel, a talajjal érintkező szerkezetek esetében a külső oldali hőátadási tényező hatása elhanyagolható.

2) Az üvegezésre és a távtartókra együttesen értelmezett átlag.

### 5.2.3. A számítás hőellenállásokkal

A hővezetés síkfalra vonatkozó egyenletét (5.12 egyenlet) úgy rendezzük át, hogy a hőmérsékletkülönbsége maradjon a jobb oldalon, az eredmény

$$\dot{q} = U \cdot (t_{be} - t_{k\u00fcl})$$

$$\dot{q} \cdot \frac{1}{U} = t_{be} - t_{k\u00fcl}$$

A kifejezésben szereplő  $\frac{1}{U}$  az egységnyi felületre eső

$$R_h = \frac{1}{U} \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right] \quad 5.26$$

un. termikus- vagy hőellenállás, mértékegysége a hőátbocsátási tényező reciproka.

Írjuk fel a Fourier és az Ohm törvényt:

$$\dot{q} \cdot R_h = t_{be} - t_{k\u00fcl} \quad I \cdot R = U$$

analógia nyilvánvaló.

(Gyakran használják a hőellenállás kifejezésére az  $R_h = \frac{1}{U \cdot A} \left[ \frac{K}{W} \right]$  alakot is. Ekkor a hőellenállás nem egységnyi felületre vonatkozik!)

A hőellenállás bevezetésével az egész födém hőellenállásának kiszámítása nagyon egyszerű, mert a sorba kapcsolt ellenállások összeadásával megkapjuk az eredő ellenállást. Az **5.2. táblázat** utolsó oszlopában lévő ellenállások összeadása adja az eredő értékét.

$$R_{z\u00f6ldtet\u0151} = \frac{1}{8} + \frac{0,27}{1,45} + \frac{0,05}{1,5} + \frac{0,1}{0,06} + \frac{0,04}{0,25} + \frac{0,1}{0,3} + \frac{1}{24} = 2,52 \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Természetesen ennek a reciproka a teljes zöldtető födém hőátbocsátási tényezőjét adja.

A beton tetőre is végig számolhatjuk hasonló módon a hőmérséklet eloszlásokat és a

hővesztéséget, valamint a tetőszerkezet hőátbocsátási tényezőjét.

$$U_{betontető} = 0,475 \frac{W}{m^2 \cdot K}; \quad R_{betontető} = 2,10 \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]; \quad \dot{q}_{beton} = 8,23 \frac{W}{m^2}$$

A hőfoklefutást nem rajzoltam az **5.2. ábrába**, mert nagyon csekély az eltérés a zöldtető hőfoklefutásához képest. Leglényegesebb különbségek a hőfok lefutásban, hogy a betontető szigetelés felső része 1.5<sup>o</sup>C-al alacsonyabb hőmérsékletű, mint a zöldtető esetében, mert a felette lévő zúzalék és járólap alig szigetel a külső hideg ellen, másik lényeges eltérés, hogy a betontető járólapjának felszíne 4,62 C fok, tehát melegebb, mint a zöldtető talajának felszíne, ami 3,74 C fok. Ez is a betontető rosszabb hőszigetelését igazolja.

A zöldtetőn keresztüli hővesztés négyzetméterenként  $\dot{q}_{zöld} = 6,86 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ , míg a betontetőn

ennél kb. 20%-al nagyobb hővesztéséget hoz létre  $\dot{q}_{beton} = 8,23 \frac{W}{m^2}$ .

#### 5.2.4. Néhány megjegyzés a hőellenállással kapcsolatban

Vizsgáljuk meg a hőellenállás érzékenységét a különböző összetevőkre. Vagyis, ha bizonyos tagok hőellenállása megváltozik a tetőszerkezetben, akkor az hogyan hat az eredményre. Írjuk át az ellenállásban szereplő mennyiségeket tizedes tört alakba, hogy jobban lehessen látni egy-egy tag hatását az eredményre.

$$\begin{aligned} R_{zöldtető, száraz} &= \frac{1}{8} + \frac{0,27}{1,45} + \frac{0,05}{1,5} + \frac{0,1}{0,06} + \frac{0,04}{0,25} + \frac{0,1}{0,2} + \frac{1}{24} = \\ &= 0,125 + 0,186 + 0,0333 + 1,66 + 0,266 + 0,5 + 0,0417 = 2,78 \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right] \end{aligned} \quad 5.27$$

Száraz talaj esetén  $\lambda_{talaj} = 0,2 \frac{W}{m \cdot K}$  értékkel számolva.

Legnagyobb hatása a hőszigetelésnek van (nem meglepő módon), mert az 1,66-os hőellenállást képvisel.

Ha elhagyjuk a belső és külső hőátadás ellenállását, az érték alig változik.

Kb. 5 %-al csökken csak a hőellenállás.

$$R_{zöldtető nincs alfa} = \frac{1}{8} + \frac{0,27}{1,45} + \frac{0,05}{1,5} + \frac{0,1}{0,06} + \frac{0,04}{0,25} + \frac{0,1}{0,2} + \frac{1}{24} = 2,64 \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Ha a talaj hőszigetelő hatását figyelmen kívül hagyjuk, akkor kb. 10%-al csökken a hőellenállás.

$$R_{zöldtető nincs talaj} = \frac{1}{8} + \frac{0,27}{1,45} + \frac{0,05}{1,5} + \frac{0,1}{0,06} + \frac{0,04}{0,25} + \frac{0,1}{0,2} + \frac{1}{24} = 2,28 \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Ez már lényegesebb változást jelent kb. 18%-ot.

Az érzékenység vizsgálat a következő fejezetben tárgyalt tranziens hőátáramoztatás számításánál bír jelentőséggel.



### 5.2.5. A talaj nedvességének hatása a hőellenállásra

A dolgozat elején részletesen foglalkoztunk a talaj nedvességtartalmának hatásával. Ennek során irodalmi adatokra támaszkodva megvizsgáltuk, hogyan hat a nedvességtartalom a talaj hővezetési tényezőjére és a hőkapacitására. Csak a hővezetési tényező változásának hatását vizsgáljuk, mivel stacioner állapotot tárgyalunk. A **3.8. ábra** szerint a hővezetési tényező teljesen száraz talaj esetében akár  $\lambda_{talaj} = 0,15 - 0,3 \frac{W}{m \cdot K}$  érték is lehet. Nedves állapotban

pedig akár  $\lambda_{talaj} = 1,2 \div 1,4 \frac{W}{m \cdot K}$  értékűre is felnövekedhet.

Száraz talaj esetén már kiszámítottuk a hőellenállást az 5.27 egyenlettel. Végezzük el a teljes mértékben nedves talajra is a hőellenállás számítását, és vizsgáljuk meg ennek hatását a hőellenállásra.

A nedves talaj hőellenállásának változása hogyan befolyásolja a számítási eredményeket.

$$R_{zöldtető, nedves} = \frac{1}{8} + \frac{0,27}{1,45} + \frac{0,05}{1,5} + \frac{0,1}{0,06} + \frac{0,04}{0,25} + \frac{0,1}{1,4} + \frac{1}{24} =$$
$$= 0,125 + 0,186 + 0,0333 + 1,66 + 0,16 + 0,0714 + 0,0417 = 2,35 \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

A relatív eltérés a teljesen száraz és a teljesen nedves talajjal számított hőellenállásban.

$$H_{zöldtető} = \frac{(2,78 - 2,35)}{2,78} \cdot 100 = 15,4\%$$

Nedves talaj esetén a hőellenállás romlik kicsit, kb. 15 %-ot. Mivel a talaj nedvességtartalmát nem volt módunkban rétegenként és időben folyamatosan vizsgálni, valamint, a szélső helyzetek közötti eltérés nem nagyobb, mint 15%, ezért ennek hatásvizsgálatát külön részletesen nem végeztem el.

Itt természetesen meg kell jegyeznem, hogy ha a talaj rétegvastagsága jelentősebb, mint esetünkben, akkor a talaj nedvességtartalmának sokkal nagyobb hatása van a hőellenállásra!

### 5.3. A betontető és a zöldtető nyári „stacioner” hőtechnikai számítása

A stacioner téli zöld tető megoldásához analóg módon oldom meg a nyári állapotot is. Itt is a viszonylag nagyméretű sík falszerkezetek esetén az 5.7 egyenlet tovább egyszerűsíthető, mert a hőmérséklet csak a falszerkezetre merőleges koordináta mentén változik, a másik két irányban nem. Födém esetében ez a födémre merőleges függőleges „z” koordináta

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad 5.28$$

Többrétegű födém esetében ez a megoldás jól ismert példája az építészeti gyakorlatnak. Oldjuk meg az 5.28 differenciál egyenletet az **5.3. ábrán** látható öt rétegű betontető födém szerkezetre. Egyszerűség kedvéért feltételezzük, hogy a födém alján (mennyezet) és a födém tetején (beton járólappal teteje) ismerjük a hőmérsékleteket a mérési adatainkból, amit az **5.4. táblázat** tartalmaz.

Végezzünk el egy hőtechnikai számítást egy nyári állapottal, feltételezve, hogy közel vagyunk a stacioner állapothoz. Ezen belül is válasszuk ki a 2011.07.10. állapotot a betontetőre

vonatkozóan.

#### 5.4. táblázat mért és számított hőmérsékletek a betontető nyáron

	beltér	mennyezet	lejt beton alja	hőszigetelés alja	zúzalék alja	járólap alja	járólap teteje	külső levegő
	$t_{be}$	$t_{me}$	$t_{12}$	$t_{23}$	$t_{34}$	$t_{45}$	$t_{fel}$	$t_{kül}$
mérés	30,91				35,72	35,78	36,02	32,1
számítás	30,91	31,0	31,07	31,44	35,32	36,09	36,02	-

**Megjegyzés:** A mért és számított eltérés oka itt is hasonló, mint az 5.1. táblázat számítása esetében.

$$t_{me} = 31,0^{\circ} C ; t_{fel} = 36,02^{\circ} C$$

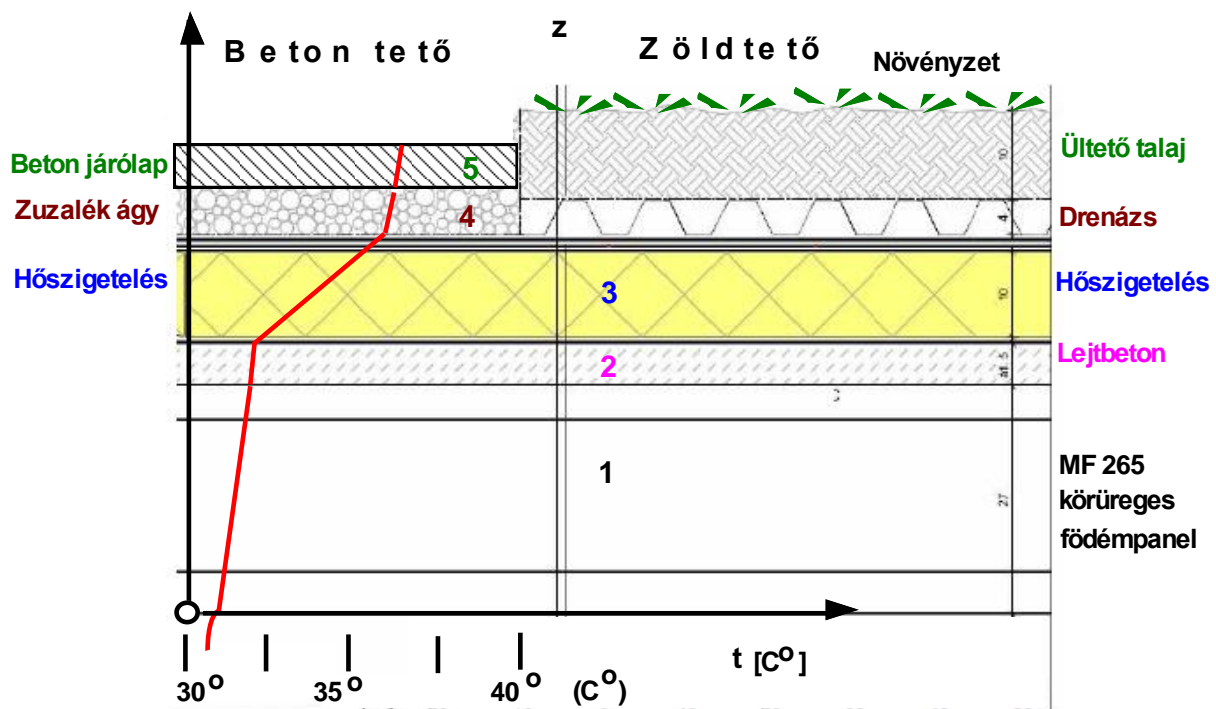
A hőmérséklet értékek napi átlagot jelentenek.

Egy rétegen belül nem változik a hővezetési tényező, így az 5.28 egyenlet egy-egy szakaszon megoldható és a megoldás egyenes. Hasonló a megoldás menete, mint a téli állapotban a zöldtető esetében.

Stacioner hőáramlást feltételezve a födémén keresztül létrejövő hőáramsűrűséget a hőátbocsátási tényezővel ( $U_{bet}$ ) általánosan felírva.

$$\dot{q} = U_{bet} \cdot (t_{be} - t_{kül}) [W / m^2]$$

Stacioner hőáramlást feltételezve minden rétegben ugyanakkora hőáram-sűrűség jön létre, így minden rétegre felírható az egyenlet.



5.3. ábra Hőfoklefutás a betontető szerkezetben nyári állapotban

Felírva belső tér és a mennyezet között

$$\dot{q} = \alpha_b \cdot (t_{be} - t_{me}) [W / m^2];$$

5.29

$$\text{majd a f\u0151d\u00e9mpanelre} \quad \dot{q} = \frac{\lambda_{fp}}{\delta_{fp}} \cdot (t_{me} - t_{12}) \text{ [W / m}^2 \text{]}; \quad 5.30$$

$$\text{a lejtbetonra} \quad \dot{q} = \frac{\lambda_{le}}{\delta_{le}} \cdot (t_{12} - t_{23}) \text{ [W / m}^2 \text{]}; \quad 5.31$$

$$\text{a h\u0151szigetelésre} \quad \dot{q} = \frac{\lambda_{h\u0151}}{\delta_{h\u0151}} \cdot (t_{23} - t_{34}) \text{ [W / m}^2 \text{]}; \quad 5.32$$

$$\text{a z\u00fazal\u00e9kra} \quad \dot{q} = \frac{\lambda_{zu}}{\delta_{zu}} \cdot (t_{34} - t_{45}) \text{ [W / m}^2 \text{]}; \quad 5.33$$

$$\text{a j\u00e1r\u00f3lapra} \quad \dot{q} = \frac{\lambda_{j\u00e1r}}{\delta_{j\u00e1r}} \cdot (t_{45} - t_{fel}) \text{ [W / m}^2 \text{]}; \quad 5.34$$

$$\text{\u00e9s v\u00e9g\u00fcl a k\u00fcls\u0151 leveg\u0151 \u00e9s a j\u00e1r\u00f3lap k\u00f6z\u0151tti h\u0151\u00e1tad\u00e1sra} \quad \dot{q} = \alpha_k \cdot (t_{fel} - t_{ki\u00fcl}) \text{ [W / m}^2 \text{]}. \quad 5.35$$

A k\u00fcls\u0151 leveg\u0151 \u00e9s a j\u00e1r\u00f3lap teteje k\u00f6z\u0151tti h\u0151\u00e1tad\u00e1si egyenletet nem használjuk a megold\u00e1sn\u00e1l. Ugyanis ny\u00e1ron a napsug\u00e1rzás jelent\u0151sebb h\u0151bevitelt jelent, mint a leveg\u0151vel t\u00f6rt\u00e9n\u0151 h\u0151\u00e1tad\u00e1s. R\u00e1ad\u00e1sul a sug\u00e1rzás nappal h\u0151t ad a tet\u0151nek, m\u00edg a k\u00f6rnyez\u0151 leveg\u0151 \u00e1ltal\u00e1ban h\u00fcti a tet\u0151t, \u00edgy ellent\u00e9tes a k\u00e9t h\u0151\u00e1ram. Az 5.35 egyenlet alkalmaz\u00e1sa anom\u00e1li\u00e1t vinne a rendszerbe. Itt felt\u00e9telezz\u00fck, hogy a j\u00e1r\u00f3lap felsz\u00edn\u00e9n kialakul\u00f3 h\u0151m\u00e9rs\u00e9klet a sug\u00e1rzás \u00e9s a h\u0151\u00e1tad\u00e1s egy\u00fcttes hatás\u00e1nak eredm\u00e9ny\u00e9re j\u00f6tt l\u00e9tre.

Ezekb\u0151l az egyenletekb\u0151l kifejezhet\u0151k a h\u0151m\u00e9rs\u00e9klet k\u00fcl\u00f6nbs\u00e9gek, ha  $\frac{\lambda}{\delta}$  \u00e9rt\u00e9kekkel \u00e9s az alf\u00e1val osztunk. Ezut\u00e1n \u00f6sszeadva az egyenleteket megkapjuk a h\u0151\u00e1tbocs\u00e1t\u00e1si t\u00e9nyez\u0151t ( $U_{bet}$ ).

$$U_{bet} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_b} + \frac{\delta_{fp}}{\lambda_{fp}} + \frac{\delta_{le}}{\lambda_{le}} + \frac{\delta_{h\u0151}}{\lambda_{h\u0151}} + \frac{\delta_{z\u00fa}}{\lambda_{z\u00fa}} + \frac{\delta_{j\u00e1r}}{\lambda_{j\u00e1r}}}. \quad 5.36$$

A szok\u00e1sos \u00e9p\u00edt\u0151anyagokra \u00e9rv\u00e9nyes \u00e9rt\u00e9keket felv\u00e9ve az **5.5 t\u00e1bl\u00e1zatb\u00f3l**

### 5.5. t\u00e1bl\u00e1zat A r\u00e9tegek anyagjellemz\u0151i a betontet\u0151ben

Sor	R\u00e9teg	H\u0151\u00e1tad\u00e1si t\u00e9nyez\u0151 $\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	R\u00e9tegvastags\u00e1g $\delta$ [m]	H\u0151vezet\u00e9si t\u00e9nyez\u0151 $\lambda$ [W/mK]	H\u0151ellen\u00e1ll\u00e1s $R = \frac{\delta}{\lambda}; R = \frac{1}{\alpha}$ R[m <sup>2</sup> K/W]
be	bels\u0151 h\u0151\u00e1tad\u00e1s	8	–	–	0,125
1	f\u0151d\u00e9mpanel	–	0,27	1,545	0,186
2	lejtbeton	–	0,05	1,5	0,033
3	h\u0151sziget\u00e9s	–	0,1	0,06	1,66
4	z\u00fazal\u00e9k	-	0,05	1,1	0,045
5	j\u00e1r\u00f3lap	-	0,04	1,4	0,0286
k\u00fcl	k\u00fcls\u0151 h\u0151\u00e1tad\u00e1s	24	–	–	0,0417

$$U_{bet} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,27}{1,45} + \frac{0,05}{1,5} + \frac{0,1}{0,06} + \frac{0,05}{1,1} + \frac{0,04}{1,4}} = 0,476 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad 5.37$$

Így a hőáramsűrűség kiszámítható a belső és a külső hőmérséklet (járólap felszíni hőmérséklete) segítségével az 5.32 egyenlet alapján.

$$\dot{q}_{bet} \cong U_{bet} \cdot (t_{be} - t_{fel}) = 0,476 \cdot (31,0 - 36,02) = -2,39 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad 5.38$$

Ezt követően ki tudjuk számítani az egyes rétegek határain a hőmérsékleteket az egyes rétegekre felírt egyenletekkel. Az eredményt az **5.4. táblázat** számítás sorában tüntettük fel, valamint az **5.3. ábrán** az egyes rétegekben piros vonallal be is rajzoltuk a hőfokfüggvényt.

A zöldtetőre a nyári állapotban is elvégezhető a hőnyereség számítása. Itt a fő gondot az jelenti, hogy a mérésből kapott eredmények, még több nap átlagában is jelentősen eltérnek a stacioner megoldástól. Ezt már elemeztük a **4.20 ábra** alapján. Mint ott láttuk, a zöldtető belső része hidegebb volt mind a beltéri, mind a külső téri átlag hőmérsékletnél. Így nincsen stacioner állapot.

Közelíthető (elég durván) a hőnyereség számított értéke úgy, hogy csak a küldő hőmérsékletét és a beltér hőmérsékletének napi heti, havi átlagát alapul véve a zöld tetőre kiszámított hőátbocsátási tényezővel számolva.

Végezzük el a hőtechnikai számítást egy nyári állapottal, feltételezve, hogy közel vagyunk a stacioner állapothoz. Ezen belül is válasszuk ki a 2011.07.10. állapotot a zöldtetőre vonatkozóan. Ezt a napot vizsgáltuk a betontető esetében is. A hőmérséklet értékek napi átlagot jelentenek. Itt is éltünk azzal a feltételezéssel, hogy külső hőátadási tényező hatását kivettük a számításból.

Egyenlettel felírva

$$\dot{q}_{zöld} \cong U_{zöld} \cdot (t_{be} - t_{fel}) = 0,396 \cdot (31,0 - 34,6) = -1,425 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad 5.39$$

$$t_{be} = 31,0^0 C ; t_{fel} = 34,6^0 C$$

Lényeges eltérés, hogy a betontető járólapjának felszíne 34,6 C fok, tehát hidegebb, mint a betontető felszíne, ami 36,02 C fok. Ez is a betontető rosszabb hőszigetelését igazolja.

A zöldtetőn keresztüli hőnyereség négyzetméterenként  $\dot{q}_{zöld} = -1,425 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ , míg a

betontetőn ennél kb. 70%-al több hőnyereséget hoz létre  $\dot{q}_{beton} = -2,39 \frac{W}{m^2}$ . Ha adott esetben

ezt mesterséges hűtéssel szeretnénk elvezetni, akkor ilyen arányban nőne meg a hűtés villamos energia igénye a zöldtetőhöz képest. Itt természetesen ismét hangsúlyozni kell, hogy a nyári esetben a hőáramlás még hosszabb idő átlagában is eltér a stacioner állapottól. Tehát a számításunk elég pontatlan eredményt ad!

## 6. A tranziens hőáramlás számítása

A negyedik fejezetben a mérési eredmények elemzésekor láttuk, hogy nyáron még hosszabb idő átlagát tekintve sem lehet stacionernek tekinteni a hőtranszportot a föld belsejében. Így mindenképp érdemes az időben változó hőtranszporttal foglalkozni.

Az 5.5 hővezetés

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad 6.1$$

differenciálegyenletet a föld esetében tudjuk egyszerűsíteni. A térbeli változások közül csak a „z” irányú deriváltat kell egy nagy felületű föld esetében figyelembe venni. Ezt az egyszerűsítést a stacioner megoldás esetében is megtettük.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad 6.2$$

Az egyenletnek legtöbbször csak numerikus megoldását tudjuk előállítani. A numerikus megoldással később foglalkozom. De az egyenletnek létezik bizonyos egyszerűbb esetekben analitikus megoldása is.

### 6.1 Egy analitikus megoldás

A következő gondolatmenet sok könyvben megtalálható, többek között a Seppo Louhenkilpi, Felde Imre [68] elektronikus jegyzetben is.

A tranziens hőátvitel esetekre a hővezetést leíró Fourier differenciálegyenlet analitikus megoldására többféle eljárás létezik, például:

- Fourier módszer (szorzat-szeparációs eljárás),
- Fourier- ill. Laplace transzformáció alkalmazása.

Nézzük a Fourier-módszer fő lépéseit egy réteg esetében. Lehetséges, hogy a több rétegű tetőszerkezet esetében is létezik analitikus megoldás, de ennek részletei nagyon bonyolultnak látszanak.

A következőkben a szorzat-szeparációs módszert ismertetjük. Az alapegyenletet a H vastagságú síklapokkal határolt földemre lehet alkalmazni, vagy a föld belsejében vagyunk a határoló falaktól távol.

Legyen a megoldás kezdeti feltétele

$$T(z, t)_{t=0} = F(z) \quad 6.3$$

folytonos függvény. A szükséges peremfeltételek a

$$T(z=0, t) = 0 \quad 6.4$$

$$T(z=H, t) = 0$$

adott állandó értékek. A most bemutatott eljárás csak arra az esetre igaz, ha a két peremen azonos, sőt zérus a hőmérséklet. (A hőmérsékleti skála nullpontja viszont eltolható.)

A mi esetünkben a beltéri és a zöldtető felszínének hőmérséklete sem időben sem térben nem

állandó. Az analitikus módszer ilyen esetekre csak igen korlátozottan használható és igen bonyolult módszerekkel. Közelíthetők sinus függvényekkel, mint azt a **4. fejezetben** a **4.16. ábrán** láttuk.

Így csak a legegyszerűbb 6.4 egyenlet szerinti peremfeltételekre mutatjuk be az analitikus megoldást.

A módszer lényege, hogy megoldást a

$$T(z, t) = S(t) \cdot Y(z) \quad 6.5$$

azaz két egyváltozós függvény szorzatának alakjában keressük. A megoldáshoz a problémát visszavezetjük két másodrendű differenciálegyenlet megoldására.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = S'(t) \cdot Y(z) \quad 6.6$$

és

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = S(t) \cdot Y''(z) \quad 6.7$$

Visszahelyettesítve az 6.2 egyenletbe kapjuk, hogy

$$S'(t) \cdot Y(z) = a \cdot S(t) \cdot Y''(z)$$

Majd rendezve az egyenletet

$$\frac{S'(t)}{S(t)} = a \frac{Y''(z)}{Y(z)}$$

Belátható, hogy a baloldali egyenlet csak a t idő, a jobboldali csak az z helykoordináta függvénye. Ezért az egyenlőség tetszőleges t > 0 és x esetén csak akkor állhat fenn, ha a bal és jobb oldal egy állandóval egyenlő. Ezt a konstans az irodalomban szokásosan -λ-val jelölik. (Ez nem azonos a hővezetési tényezővel!)

$$\frac{S'(t)}{S(t)} = a \frac{Y''(z)}{Y(z)} = -\lambda$$

Ebből az egyenletből egy első és egy másodrendű közönséges differenciálegyenlet származtatható, amelyek

$$S'(t) + a \cdot \lambda \cdot S(t) = 0 \text{ és} \quad 6.8$$

$$Y''(z) + \lambda \cdot Y(z) = 0 \quad 6.9$$

A két differenciál egyenlet olyan megoldásait kell előállítani, amelyek egyúttal kielégítik a peremfeltételeket is. Most egy egyszerűbb peremfeltételi rendszert mutatok csak be, amikor is az 6.4 egyenletekben a peremen a hőmérséklet nem változik időben, sőt mindkét peremen egyenlő és zérus.

$$Y(0) = 0 \quad 6.10$$

$$Y(H) = 0$$

Keressük azon  $\lambda$  sajátértékek halmazát, valamint ezen sajátértékekhez tartozó  $Y(x)$  sajátfüggvények halmazát, amelyek kielégítik az alábbi egyenleteket:

$$Y''(z) + \lambda \cdot Y(z) = 0$$

$$Y(0) = Y_0; Y(H) = Y_M$$

Ez a feltétel azt jelenti, hogy a peremen nulla a hőmérséklet. A hőmérsékleti skála nulla pontját el lehet tolni különösebb következmény nélkül, így lehet akár 20 C fok is kinevezve a nullának. A differenciál egyenletek ugyan úgy megoldhatók ilyen esetben is. A többi hőmérsékletet ehhez képest kell ekkor megadni. (A Celsius és a Kelvin skála is hasonló képen működik.) A matematikai probléma lehet ilyen értelemben valós is.

A  $\lambda$  előjelétől függően három esetet különböztetünk meg:

Ha  $\lambda < 0$ , Ekkor a megoldás:

$$Y(z) = C_1 \cdot e^{-z \cdot \sqrt{-\lambda}} + C_2 \cdot e^{z \cdot \sqrt{-\lambda}}$$

A  $C_1$  és  $C_2$  konstansok meghatározása a 6.1 egyenlet feltételekből adódóan az alábbi lineáris egyenletrendszer megoldásához vezet.

$$C_1 + C_2 = 0$$

$$C_1 \cdot e^{-H \cdot \sqrt{-\lambda}} + C_2 \cdot e^{H \cdot \sqrt{-\lambda}} = 0$$

Ennek megoldása csak a triviális megoldás, amikor

$$C_1 = C_2 = 0$$

Ha  $\lambda = 0$ , akkor

$$Y(z) = C_1 \cdot z + C_2$$

Ennek az esetnek is csak a

$$C_1 = C_2 = 0$$

a megoldása.

És végül, ha  $\lambda > 0$ , akkor

$$Y(z) = C_1 \cdot \cos(z \cdot \sqrt{\lambda}) + C_2 \cdot \sin(z \cdot \sqrt{\lambda})$$

A peremfeltételekből a  $z=0$  feltételből adódik, hogy  $C_1 = 0$ .

A peremfeltételekből a  $z=H$  feltételből adódik, hogy  $C_2$  együtthatójának kell zérusnak lenni, azaz,  $\sin(H \cdot \sqrt{\lambda}) = 0$ .

Belátható, hogy minden olyan  $\lambda$  értékre megoldást ad az egyenlet, amikor

$$H \cdot \sqrt{\lambda} = n \cdot \pi,$$

ahol  $n = 0; 1; 2$  stb. Ebből fejezzük ki a  $\lambda$ -t.

$$\lambda = \left[ \frac{n \cdot \pi}{H} \right]^2 \quad n = 1; 2; 3; \dots$$

Így a  $C_1=0$  és  $C_2$  szabadon választható, legyen  $C_2=1$ .

$$Y_n(z) = \sin\left(z \cdot \frac{n \cdot \pi}{H}\right) \quad n = 1; 2; 3; \dots$$

Minden egyes megoldás és annak összege is megoldása a differenciálegyenletnek.

Nézzük ezek után az időtől függő 5.32 differenciálegyenlet megoldását

$$S'(t) + a \cdot \lambda \cdot S(t) = 0$$

Belátható, hogy az egyenletnek sok megoldása lehet  $\lambda$  értékétől függően.

$$S_n(t) = a_n \cdot e^{-a \cdot \lambda_n \cdot t}$$

$$S_n(t) = a_n \cdot e^{-a \cdot \left[ \frac{n \cdot \pi}{H} \right]^2 \cdot t}$$

ahol  $a_n$  szabadon választható konstansok.

A megoldás függvény ennek megfelelően

$$T(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} S_n(t) \cdot Y_n(z)$$

$$T(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot e^{-a \cdot \left[ \frac{n \cdot \pi}{H} \right]^2 \cdot t} \cdot \sin\left(z \cdot \frac{n \cdot \pi}{H}\right)$$

A kezdeti feltételt egy sorfejtéssel tudjuk meghatározni



$$T(z, t)_{t=0} = F(z) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \sin\left(z \cdot \frac{n \cdot \pi}{H}\right)$$

Az  $F(z)$  sorba fejthető, és a konstansok értéke a következő kifejezéssel számítható:

$$a_n = \frac{2}{H} \cdot \int_0^H F(z) \cdot \sin\left(z \cdot \frac{n \cdot \pi}{H}\right) \cdot dz \quad n = 0; 1; 2; 3..$$

Legyen egy speciális eset, amikor  $F(z) = T_k$ .

$$a_n = \frac{2 \cdot T_k}{H} \cdot \int_0^H \sin\left(z \cdot \frac{n \cdot \pi}{H}\right) \cdot dz \quad n = 0; 1; 2..$$

$$a_n = \frac{2 \cdot T_k}{H} \cdot \left(\frac{H}{n \cdot \pi}\right) \cdot \left[\cos\left(z \cdot \frac{n \cdot \pi}{H}\right)\right]_0^H = -\frac{2 \cdot T_k}{n \cdot \pi} \cdot [\cos(n\pi) - \cos(0)]$$

$$a_n = \frac{2 \cdot T_k}{n \cdot \pi} \cdot [1 - \cos(n\pi)]$$

$a_n = 0$ , ha  $n$  páros  $n=2, 4, 6, \dots$ , és

$a_n = \frac{4 \cdot T_k}{n \cdot \pi}$ , ha  $n$  páratlan  $n=1, 3, 5, \dots$

$a_{2n} = 0$ , ha  $n=1, 2, 3, \dots$ , és  $a_{2n+1} = \frac{4 \cdot T_k}{(2n+1) \cdot \pi}$ .

Ha az egyszerű kezdeti feltételt használjuk  $F(z) = T_k$  akkor a megoldást a következő alakban kapjuk.

$$T(z, t) = \frac{4 \cdot T_k}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \cdot e^{-a \left[\frac{(2n+1) \cdot \pi}{H}\right]^2 \cdot t} \cdot \sin\left(z \cdot \frac{(2n+1) \cdot \pi}{H}\right)$$

A Fourier differenciálegyenlet analitikus megoldására ajánlott Fourier- ill. Laplace transzformáció alkalmazását az alábbi példán mutatjuk be. A következőkben egy egydimenziós hővezetési feladat megoldását mutatjuk be. Végtelen féltérre a hővezetést,  $z$ -irányban a következő egyenlet írja le:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad 6.11$$

Legyen a termikus kezdeti feltétel

$$T(z, t)_{z=0} = T_0$$

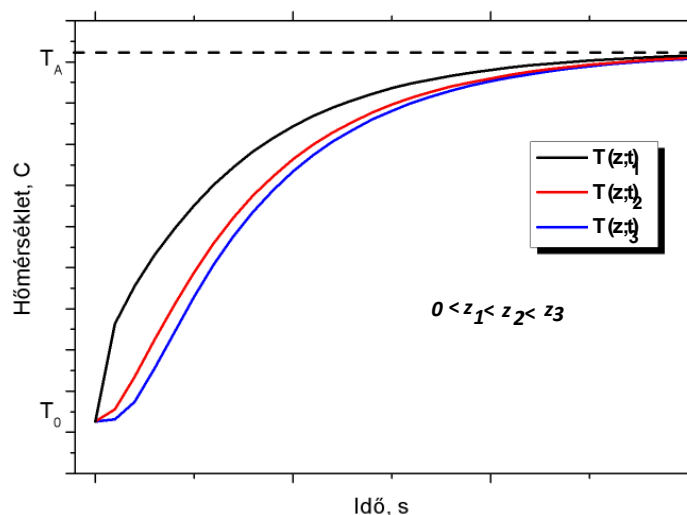
ahol  $T_0$  a fődém konstans hőmérséklete  $t=0$  időpillanatban.

Az elsőfajú peremfeltétel

$$T(z=0, t) = T_A \tag{6.12}$$

$$0 < z_1 < z_2 < z_3$$

Melegítés esetén, ha  $T_0 < T_A$ , akkor a **6.1. ábra** szerint alakul a hőmérséklet.



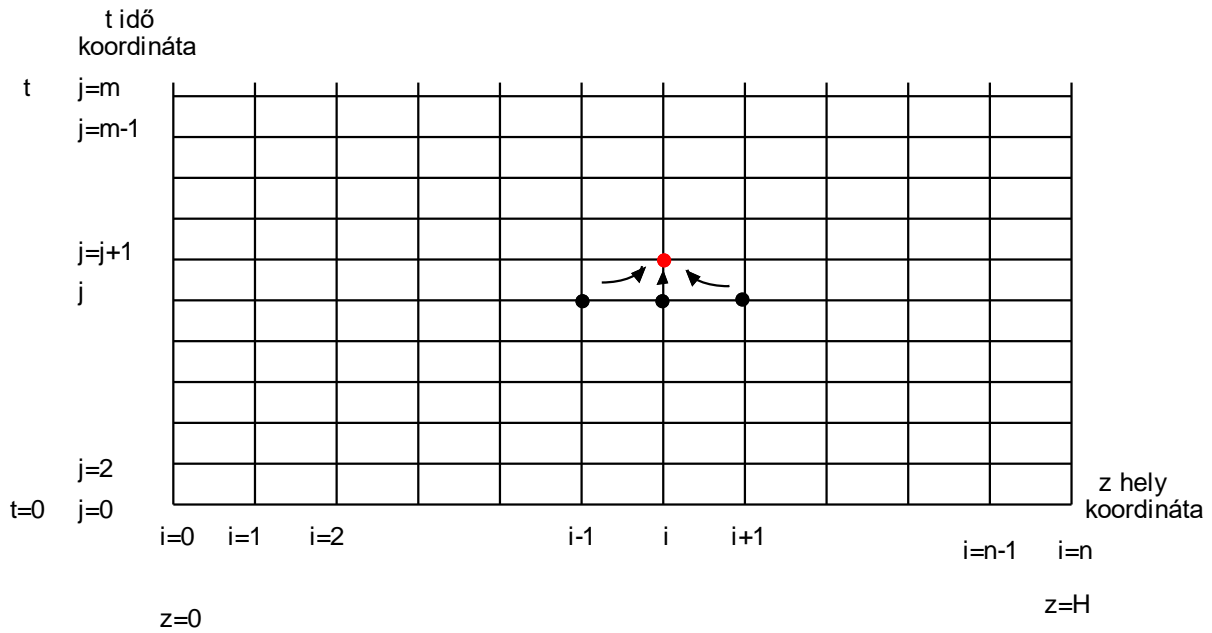
**6.1. ábra** Végtelen fődém analitikus megoldása hűtés esetére

A diagram három pont hőmérsékletének időbeli alakulását mutatja. A melegített felülethez ( $z = 0$ ) legközelebb lévő  $z_1$  pontban kezd el leggyorsabban melegedni a fődém. Ahogy megyünk egyre beljebb a fődémbe  $z_2$  és  $z_3$  helyekre, úgy bizonyos idő elteltével, egyre később indul meg a melegedés. A hőmérséklet változás jellege mindegyik pontban exponenciális növekedést mutat.

A kapott analitikus megoldás sajnos még egy réteg esetében sem írja le a fődémen be- vagy kiáramló hő valóságos viszonyait. A valós folyamatok leírását több rétegű fődém esetében a numerikus megoldással tudjuk meghatározni. Ez a következő fejezetünk tárgya.

## 6.2. Tranziens megoldás véges differencia módszerrel

Az egydimenziós esetet viszonylag könnyen meg lehet oldani numerikus eljárásokkal. Ennek egyik legegyszerűbb módja a Schmidt-Binder szerkesztési eljárás [38], amely egy grafikus módszer. Másik könnyen kivitelezhető módszer, ha diszkrét felosztást alkalmazunk mind a „ $z$ ” helykoordináta, mind pedig a „ $t$ ” időkoordináta mentén. Ehhez legegyszerűbb egy equidisztáns felosztást alkalmazni a hely és az időben egyaránt.



**6.2. ábra Végteles fődém numerikus megoldása hűtés esetére**

A hővezetés differenciálegyenletét a **6.2. ábra** szerinti háló pontjaiban tudjuk kiszámítani. Ehhez az egyenletben szereplő differenciálhányadosokat differencia sémákkal helyettesítjük.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad 6.13$$

Az idő szerinti deriváltat a

$$\frac{\partial T}{\partial t} \cong \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t}$$

kifejezéssel, és a hely szerinti második deriváltat a

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \cong \frac{T_{i-1,j} + T_{i+1,j} - 2 \cdot T_{i,j}}{\Delta z^2}$$

kifejezéssel helyettesítjük a szokásos módon. Visszahelyettesítve a differenciálegyenletbe

$$\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t} = a \cdot \frac{T_{i-1,j} + T_{i+1,j} - 2 \cdot T_{i,j}}{\Delta z^2}$$

Ebből kifejezhető az egy időlépéssel későbbi hőmérséklet:  $T_{i,j+1}$

$$T_{i,j+1} = T_{i,j} + \frac{a \cdot \Delta t}{\Delta z^2} [T_{i-1,j} + T_{i+1,j} - 2 \cdot T_{i,j}] \quad 6.14$$

rekurzív formulája. Ha elsőfajú peremeket alkalmazunk a  $z=0$  és  $z=H$  helyen, akkor minden belső pontban ki tudjuk egyszerűen számítani a hőmérséklet értékeket. Természetesen egy megfelelő kezdeti feltételt is meg kell adni a  $t=0$  időpontban.

A  $z$  irányú felosztást megválaszthatjuk szabadon. Természetesen megfelelő pontszámot kell felvennünk az adott távolságon. Ha a teljes fődém vastagságában számolunk a 0,56 m

hosszon, esetünkben  $\Delta z = 0,01m$  értéket választottam. Az időlépést azonban 6.14 képletben a következők szerint

$$\frac{a \cdot \Delta t}{\Delta z^2} \leq 0,5$$

kell választani a numerikus stabilitás érdekében.

Két egyszerű számítási eredményt mutatok be a fent leírt numerikus módszer segítségével.

Előbb azonban nézzük meg a felvett anyagi jellemzőket. Ezek a földem közel átlagos értékeinek vehetők, melyek a hőszigetelés a körüreges beton a különböző egyéb borítások átlagos értékei.

A homogén földem adatai

a hővezetési tényező ,  $\lambda = 0,25 \frac{W}{m \cdot K}$

a sűrűség  $\rho = 1300 \frac{kg}{m^3}$

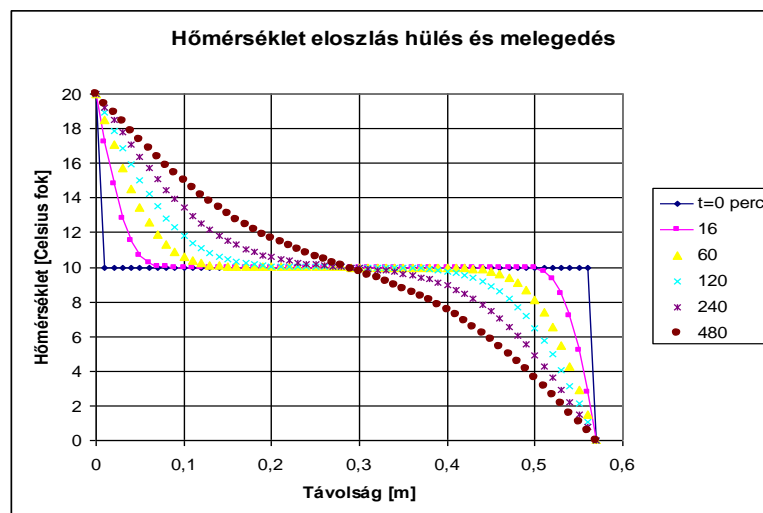
a fajhő  $c = 500 \frac{J}{kg \cdot K}$

Ezekből az adatokból kiszámítható a hőfokvezetési tényező  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = 3,85 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$

Az időlépést  $\Delta t = 120s = 2 \text{ perc}$  -nek választottam. Ebből a stabilitás feltétele teljesül.

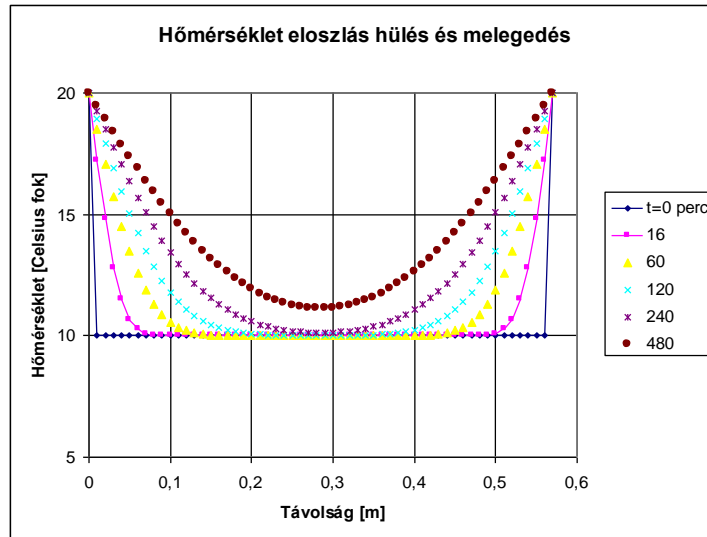
$$\frac{a \cdot \Delta t}{\Delta z^2} = \frac{3,85 \cdot 10^{-7} \cdot 120}{0,1^2} = 0,461 \leq 0,5$$

A **6.3. ábrán** egy  $10^\circ C$  kezdeti hőmérsékletű homogén földemet felülről  $0^\circ C$ , alulról  $20^\circ C$  elsőfajú peremmel láttam el. A számítás a kialakuló hőfokeloszlást mutatja a kezdeti időpillanatban, valamint 16, 60, 120, 240 és 480 perc (8 óra) elteltével.



**6.3. ábra Homogén földem felső hűtése és alsó melegítése**

A másik példa eredményét a **6.4. ábra** mutatja. Minden adat azonos az előbbivel, kivéve a peremfeltételeket. A  $10^\circ C$  kezdeti hideg földemet alulról és felülről is  $20^\circ C$  peremmel láttam el.



6.4. ábra Homogén földem alsó és felső melegítése

A megadott példa nem realiztikus, mert pontosan ilyen állapotot nem lehet előállítani egy földem esetében a valóságban. Viszont a földem hőtehetetlenségét jól mutatja, hiszen 8 óra melegítés után is a középső része még mindig csak kb. 12° C.

Ilyen mérési eredménnyel találkoztunk a zöldtető esetében (4.25. ábra) a nyári mérések során, amikor a földem belseje hidegebb volt a földem aljánál és a tetejénél is.

### 6.3. Tranziens megoldás numerikus szoftverrel, elméleti háttér

A numerikus megoldásra manapság már nagyon sok elméletileg jól megalapozott és a gyakorlat számára is nagyon jól és megbízhatóan használható numerikus kód áll rendelkezésre. A probléma megoldására az ANSYS CFX szimulációs programot használtuk. Az elméleti, matematikai alapjait csak érintem ebben a fejezetben, hisz korábban a hővezetést már részleteiben ismertettem állandósult és tranziens esetben is.

A 6.15 egyenlet az energia megmaradást írja le matematikai alakban, ami egy az energiátranzportot leíró parciális differenciálegyenlet. Az egyenletekben található hőtechnikai paramétereket  $\rho, \lambda, c_p$  állandónak tekintetem az összes a modellben szereplő anyagra (beton, polisztirol, zúzalékkő) a talajtól eltekintve. Szigorúan véve a talaj esetében a sűrűséget a fajhőt és a hővezetési tényezőt is változónak kellene tekinteni. A párolgás (lecsapódás) miatt a talaj víztartalma változik, így a sűrűsége és a fajhője is változik. A párolgás (lecsapódás) a talajban, mint belső hőforrás is szerepel. Jelen dolgozatunkban, vizsgálat során elhanyagoltam a sűrűség és a fajhő időbeli változását, valamint a hőforrástól is eltekintettünk. Így a talaj esetén a sűrűséget és a fajhőt állandónak, viszont a talaj hővezetési tényezőjét, a  $\lambda$ -t időfüggőnek tekintetem. A hővezetési tényező időfüggése annak modellezésére szolgál, hogy a talajban lévő növényzet nyáron egyfajta hűtési hatást fejt ki a talaj felső rétegében, ami végső soron matematikai modellezési szempontból jobb hőszigetelésként is felfogható.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot c \cdot T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \right) + q_v \quad 6.15$$

A validálás során a talaj hővezetési tényezőjét különböző értékek között változtattam. A legjobbnak talált értékek a következő állandókból álló függvény:

$$\lambda = \begin{cases} c_1 & 0 \leq t < 5 \\ c_2 & 5 \leq t < 21, \text{ ahol a } t \text{ időt óra egységekben értjük.} \\ c_1 & 21 \leq t < 24 \end{cases}$$

A modell validálása során az éjszakai hővezetési tényező értékét  $c_1 = 0.4 \text{ W/mK}$ -nek a nappali értékét  $c_2 = 0.2 \text{ W/mK}$ -nek kaptam.

A megoldás során kihasználtam azt a tényt, hogy a deriváltak közül csak a függőleges irányú tekinthető nullánál nagyobb értékűnek, mint arról már korábban is tárgyaltunk:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \cong 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \cong 0, \quad \left| \frac{\partial T}{\partial z} \right| > 0.$$

A megoldandó parciális differenciálegyenlet lényegében a

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{6.16}$$

egyenletre egyszerűsödik. A megoldás fő problémáját a geometria és a peremfeltételek adják. Ezért nem várhatunk analitikus megoldást. A födém geometriáját igyekeztem minél részletesebben megadni, hogy a valóságnak minél jobban megfeleljen a modellünk.

Az ANSYS program lehetőséget ad arra, hogy a födém geometriáját minél részletesebben megadjuk a számításokhoz.

### 6.3.1 A födém geometriájának megadása

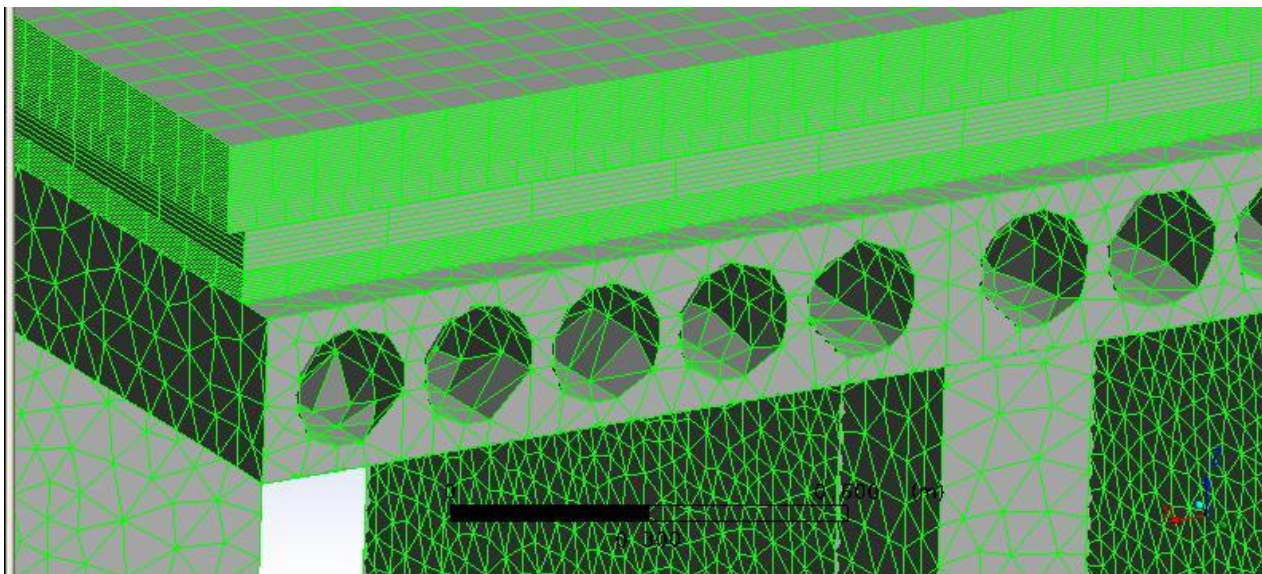
A legtöbb szimulációs program ma már olyan, szinte tetszőleges komplexitású 3D-s geometria elkészítését képes legyen fogadni. Így a szimuláció első lépéseként a födém szerkezetét elkészítettem 3D modellező szoftverben és olyan fájlban adtam meg, amelyet az ANSYS képes fogadni (igs kiterjesztésű). Az **5.1 ábra** mutatja a 3D makettet, amit az óvodáról készítettem.

A szimuláció során csak a zöldtető és a betontető egy-egy részét választottam ki számítás céljára. A födém rétegeinek megadásakor törekedtünk arra, hogy a hővezetés szempontjából fontos rétegeket minél részletesebben adjuk meg a szimuláció számára. Szintén az előző fejezetben lévő **5.1 ábra** mutatja az egyes rétegeket a zöldtető és a betontető esetében.

A tetőszerkezet alapvetően sík lemezek egymásra épüléséből rakható össze. Ez megkönnyítette a geometria megadását. Egyedül a körüreges födémpanel tér el ettől a szerkezettől. Ezt az elemet igyekeztem minél pontosabban az üregek megrajzolásával is geometriailag modellezni.

### 6.3.2 A födém véges térfogat hálójának generálása

A numerikus számítások végrehajtása előtt, a födém egyes rétegeire külön-külön numerikus rácsot generáltunk. A generált rácsok a körüreges beton födém kivételével mind kihúzott rácsok, ami látható is a **6.5. ábrán**. Egy előre kiválasztott sík felületen készítettünk egy relatíve nem nagy felbontású rácsot, majd ezt a felületi rácsot függőleges irányban kihúztuk. Erre azért volt szükség, mivel ezzel a szükséges rácsosztást illetve a generált cellák számát egy nagyságrenddel csökkenteni tudtam.



**6.5. ábra A födémre generált numerikus rács egy részlete**

A födém szimulációja a rács elkészítése után viszonylag egyszerű feladat volt, mert csak a peremfeltételeket és az anyagjellemzőket kellett változtatni a különböző esetekre alkalmazva. Gondolok itt a téli, nyári állapotok szimulációira, amit a következőkben fogok bemutatni.

A zöldtetőre és a betontetőre természetesen eltérő geometriájú generált rácsot készítettünk. A feladatban 1138339 elemszámot alkalmaztam.

A csomópontszámtól való függetlenséget is vizsgáltam egy-egy esetben. Erre most külön nem térek ki.

### **6.3.3 A peremfeltételek**

A födém mennyezeti oldalán és a tető felszínén a szobában mért hőmérsékleteket és zöldtető vagy a betontető felszínén mért hőmérsékleteket adtuk meg peremfeltételként. Ez tehát elsőfajú peremfeltétel volt. Itt természetesen az időben változó hőmérsékleteket kellett megadni, amit a közelítő függvénnyel vittünk be az ANSYS programba. Erre lehetőséget ad a peremfeltétel megadása. Az egyes rétegek találkozásánál az azonos hőmérséklet a csatlakozási feltétel. A födémdarab levágott oldalán pedig adiabatikus peremet adtunk meg, ami másodfajú peremként jelentkezik. A födémnek egy kiragadott darabját modelleztük, az oldalfalak hővezetésével jelen esetben nem számoltunk. (A modellt úgy készítettük el, hogy elvileg az egész épület is modellezhető, de végül ezt nem használtam jelen dolgozatban.)

### **6.4. A födém tranziens megoldásának esetei**

A mérési adatsorból kiválasztottunk egy nyári és egy téli napot a zöld tetőre és a betontetőre egyaránt. És vizsgáltuk a mérés és a számítás eredményeinek eltéréseit, illetve egyezését. A számítás során a zöldtető vagy a betontető felszínén mért és a szobában mért hőmérsékletet adtuk meg peremfeltételként. A belső rétegekben pedig a szimulációból nyert adatsorokat hasonlítottuk össze a mérési adatsorokkal. A hőmérsékletszámítás természetesen időben változó hőmérsékleteket adott ki eredményül. Három jellegzetes mérési pontot választottunk ki a födémbe. A zöldtető talajának vagy a betontetőnek a felszínén (felső rétegében), a

tetőszerkezet közbülső rétegében és a szigetelés tetején. Így gyakorlatilag a zöldtető és a betontető hőkiegyenlítését, hőszigetelését mutatom be eredményeimben.

#### 6.4.1 Tranziens számítás, a stacioner állapotban használt anyagjellemzőkkel nyári zöldtető és betontető esetén

A stacioner állapotban végzett számításokban (4. fejezet) csak a rétegvastagságokra és a hővezetési tényezőkre volt szükség a számítások elvégzéséhez. Az időben változó számításokban szükséges az egyes rétegek sűrűségének és fajhőjének ismerete is. Mivel az egyes rétegek hőfelvétele és hőleadása jelentős mértékben függ ezektől az anyagjellemzőktől. Állandósult hőátbocsátás esetében ezek az anyagjellemzők nem számítanak. Első időtől függő számítást a 6.1. táblázat adataival végeztük el, ahol a rétegvastagságok és a hővezetési tényezők megegyeznek az állandósult állapot adataival. A hővezetési tényezők a negyedik oszlopban megadott értékek, amik megegyeznek a stacioner állapot számítási értékeivel.

6.1. táblázat A rétegek anyagjellemzői (stacioner esetben érvényes értékek)

Sor	Réteg	Rétegvastagság $\delta$ [m]	Hővezetési tényező (stacioner) $\lambda$ [W/mK]	Hővezetési tényező (korrigált) $\lambda$ [W/mK]	Sűrűség $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Fajhő $c$ [J/kg/K]
1	födémpanel (beton része)	0,27	1,45	1,45	2300	750
2	lejt beton	0,05	1,5	1,5	2300	750
3	hőszigetelés	0,1	0,06	0,06	500	400
4 zöld tető	drenázs	0,04	0,25	0,25	1000	500
5 zöld tető	talaj nappal 5 <sup>h</sup> -21 <sup>h</sup>	0,1	0,3	0,2	1500	300
	talaj éjjel 21 <sup>h</sup> -5 <sup>h</sup>			0,4		
4 beton tető	zúzalék	0,05	1,1		1700	500
5 beton tető	járólap	0,04	1,4		2300	750

A számításokban egy nap lefutási értékeit vizsgáltuk. Az eredményeit összehasonlítottuk a mérés eredményeivel.

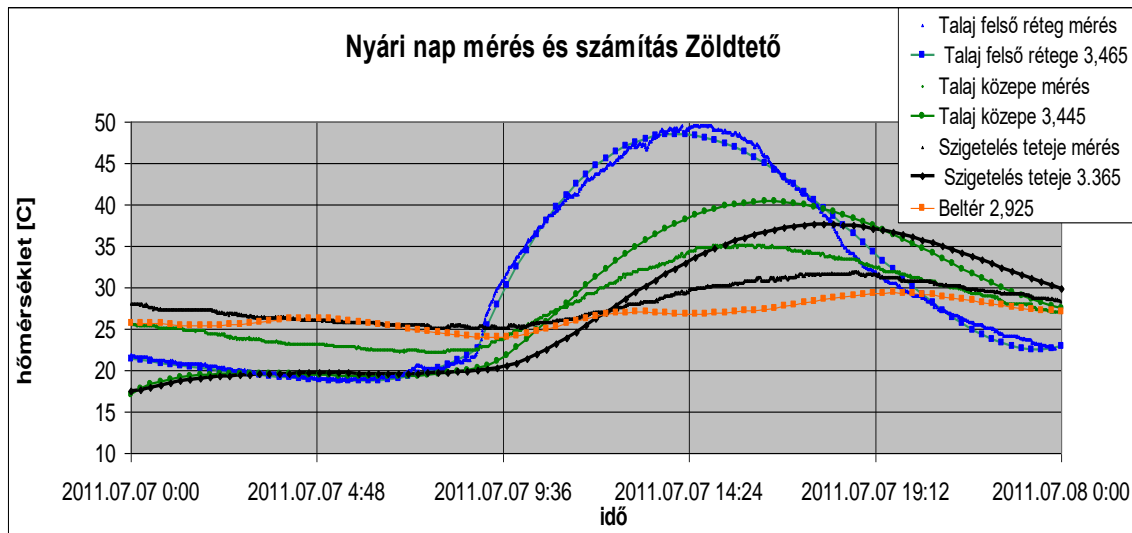
A 6.6. ábra mutatja a számítás és a mérés eredményeinek összehasonlítását diagram formájában. Három jellegzetes mérési pontot választottunk ki a födémbe. A zöldtető talajának a felső rétegében (kék), a talaj közbülső rétegében (zöld) és a szigetelés tetején lévő (fekete) pontokat. Ezen kívül még ábrázoltuk a beltér hőmérsékletének időbeli változását is (sárga görbe).

A zöldtető felső rétegének a méréseiből kapott függvényt közelítettem az egész nap folyamán. Ez a számítás egyik peremfeltétele. A másik peremfeltétel a beltér hőmérséklete, amit szintén közelítettünk, ez a sárga vonal. A talaj közepén mért és számított hőmérséklet görbe elég jelentős eltéréseket mutat. Van ahol öt fokos eltérés is kialakult a mérés és a számítás között. Hasonló a helyzet a szigetelés tetején mért és számított adatok között is. A mért és számított görbék maximum és minimum helyei időben jó egyezést mutatnak. Ez annyit jelent, hogy a födém egyes részeinek számított hőtehetlensége jól követi a méréseket. Mind a zöld, mind a fekete görbék esetében a számítás magasabb hőmérsékleteket ad a maximumok környékén és



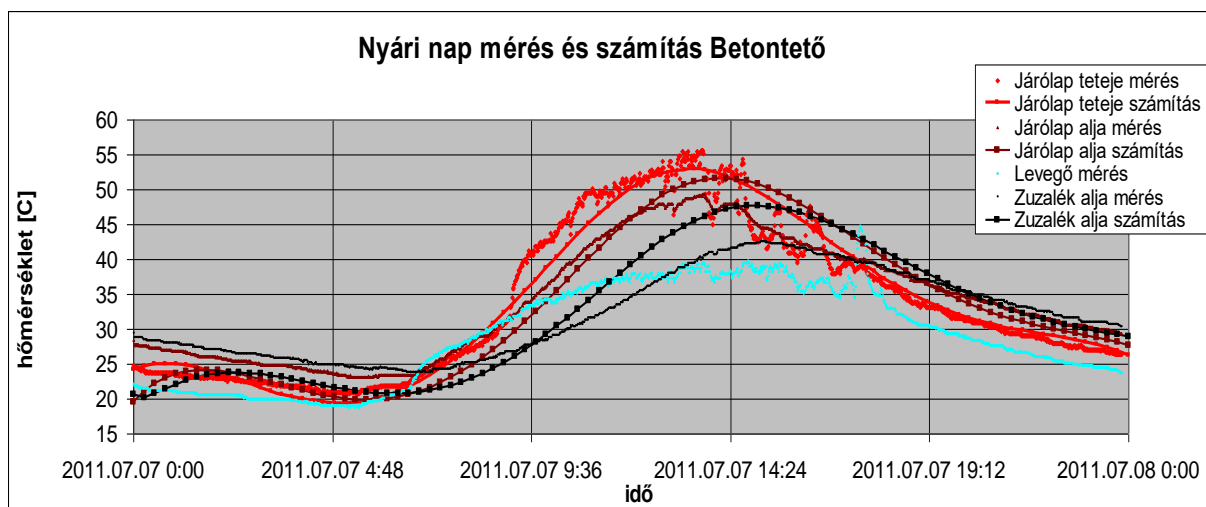
kisebbs h mrs kleteket ad a minimum  rt ekkn l. Ez pedig annyit jelent, hogy a talaj hővezetési tényezője a valóságban kisebb, mint a számított  rt ek.

(A sz m tasi eredmények jellegében is eltérnek a mérési eredményektől. Ez annak tulajdonítható, hogy nem sikerült a f d m egészére megfelelő kezdeti, kiinduló h mrs kletet felv nn nk. Néhány óra elteltével ez az anomalia megszűnik a számításokban.)



**6.6.  bra** A tranziens h raml s a zöldtető esetén a stacioner anyagjellemzőkkel

A betontető nyári számításainál a kezdeti feltételek eltérése okozta a legnagyobb eltéréseket az eredményekben. Ezeket korrigáltuk ebben az esetben is. Az alkalmazott anyagjellemzők a stacioner adatokkal sz molv  viszonylag jó egyezést mutattak a mérések és a számítások között. **A 6.7.  br n** a betontető mérési adataiban  l g nagy mérési ingadozások láthatók. E legval s n bb oka a m r szond ra eső időszakos árnyék, pl. felh  tvonul s a nap  l tt. A másik problémát a kezdeti feltétel nem pontos megadása jelentette. Ezt később korrigáltam a **(ld. 6.9.  bra)**.



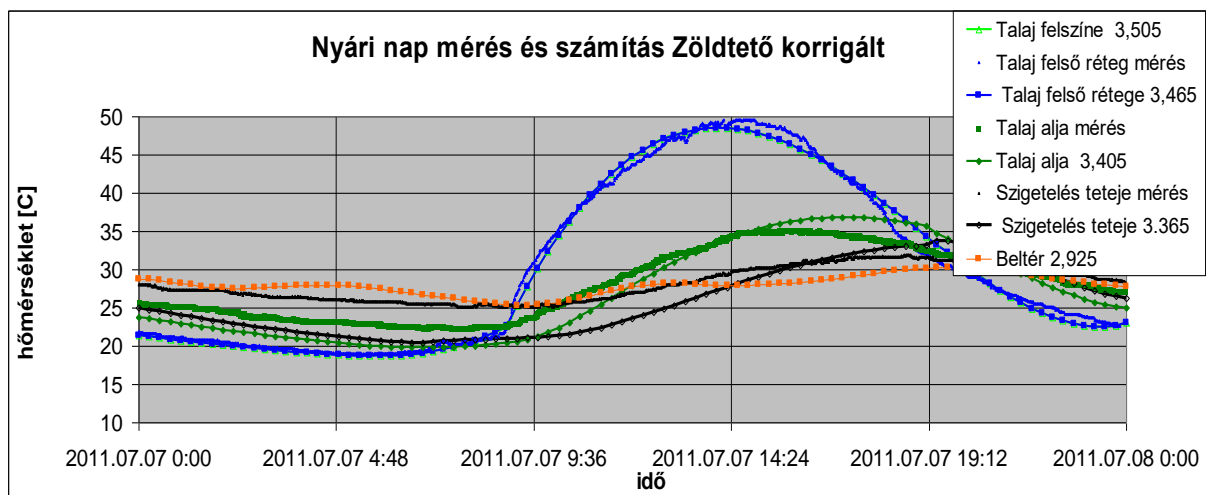
**6.7.  bra** Tranziens h raml s a betontető esetén a stacioner anyagjellemzőkkel

## 6.4.2 Tranziens számítás a korigált talaj hővezetéssel és kezdeti feltétellel nyári zöldtető és betontető esetén

A talaj hővezetési tényezőjét korigáltam. Itt több számítást és többféle korrekciót számítottam. A következőkben a legjobbnak talált korrekciót mutatom csak be. A korrekciót úgy végeztem el, hogy a nappali hővezetési tényezőt lecsökkentettem 0,2-re. Az éjszakait pedig megnöveltem 0,4-re. Így a napi átlag hővezetési tényező közelítőleg megmaradt 0,3 értékűnek.

A változtatást abból a megfontolásból tettem, hogy nappal a melegebb talaj nedvességtartalma csökken a párolgás miatt. Továbbá a növényzet is intenzívebben párologtat, így e két hatás együttesen olyan, mintha jobb hőszigetelő lenne a talaj és a növényzet együttesen a száraz talaj hőszigetelésénél.

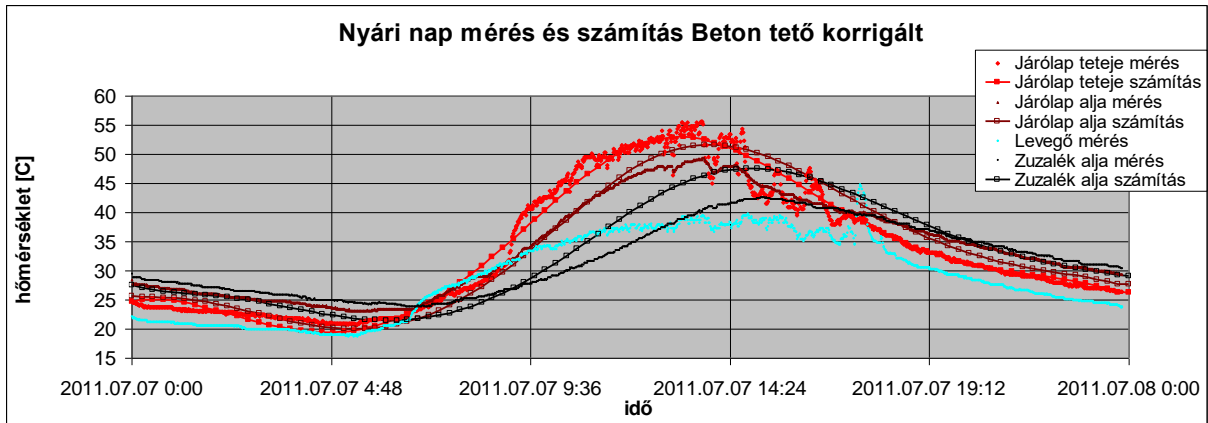
Éjszaka viszont a harmatképződés miatt a talaj nedvességtartalma nagyobb lesz, a növényzet párologtató hatása pedig kisebb. Ennek együttes eredményét egy nagyobb hővezetési tényezővel vettem figyelembe. Az napszakonként változó hővezetési tényező számítási eredményét korigált esetnek neveztem. Az összehasonlító diagramot a **6.8. ábra** mutatja.



**6.8. ábra** Tranziens hőáramlás a zöldtető esetén a korigált anyagjellemzőkkel és kezdeti feltételekkel

Mind a zöld, mind a fekete görbék esetében a számítás ugyan itt is magasabb hőmérsékleteket ad a maximumok környékén és kisebb hőmérsékleteket a minimumok környékén, de az eltérés már csak 2-3<sup>0</sup>C értékű.

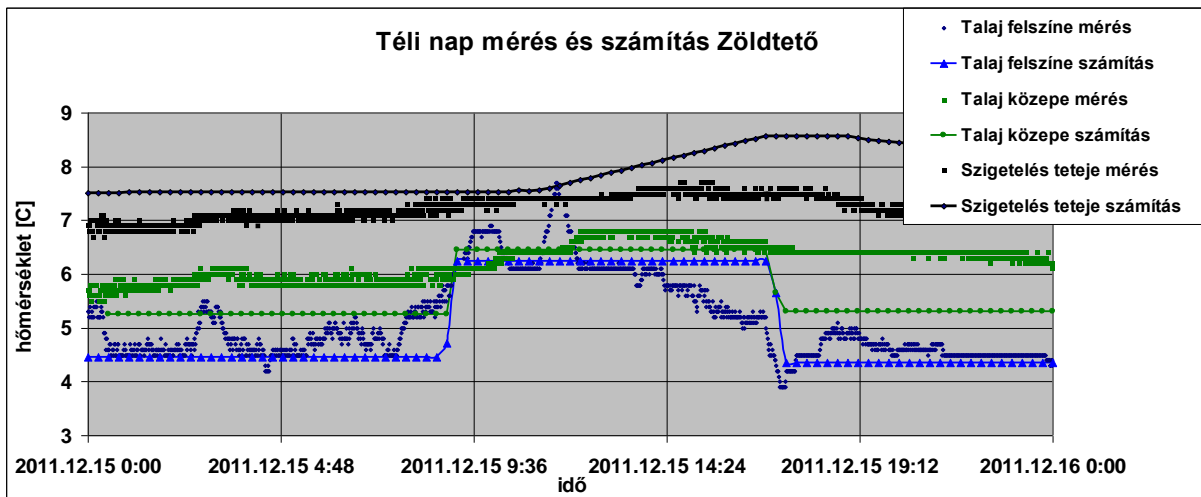
A betontető esetében a kezdeti feltételek korigálása jelentős javulást hozott a mérés és számítás eltérésének csökkentésében (**ld. 6.9. ábra**). A hőfokmező csillapításában még tapasztalható eltérés. A mérések során a szigetelés tetején kialakuló hőmérsékletek kisebb amplitúdójú lengéseket mutatnak, mint a számítások. Ezt az eltérést a felső rétegek fajhőjének növelésével tovább lehet csökkenteni. További számításaimban ezt fogom alkalmazni.



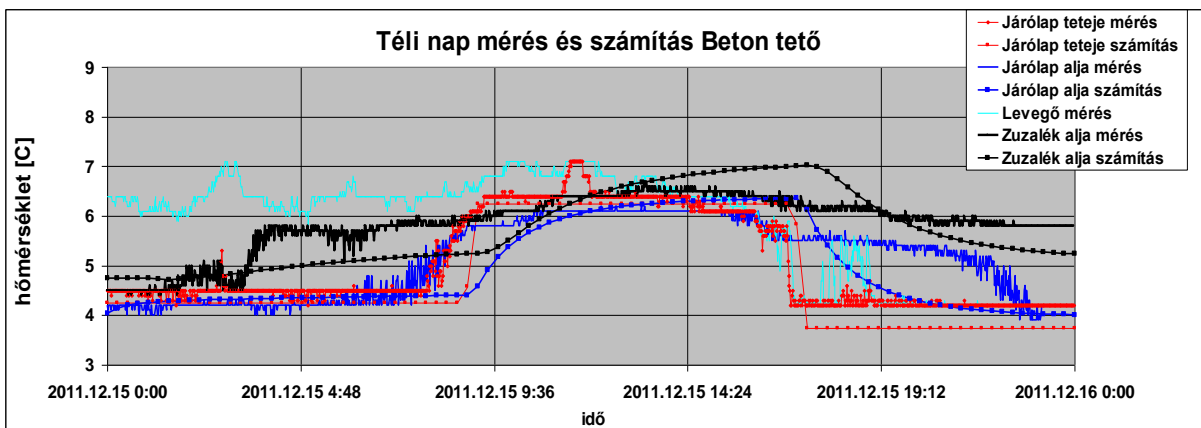
6.9. ábra Tranziens hőáramlás a betontető esetén a korrigált kezdeti feltétellel és anyagjellemzőkkel

### 6.4.3 Tranziens számítás a téli zöldtető és betontető esetén

Itt előre kell bocsájtanom, hogy a téli állapotban kicsik a hőmérsékletváltozások egy nap során. Ennek hatására a tetőszerkezetben is csekély a napi hőingadozás, mindössze 3-4°C. Ennek a következménye a diagramokon is jól látható. A mérési eredmények szóródása a kis léptékű diagramokon látszólag nagynak tűnik. Valójában csak 0,1-0,2°C.



6.10. ábra Tranziens hőáramlás a zöldtető esetén téli állapotban



6.11. ábra Tranziens hőáramlás a betontető esetén téli állapotban

A mérés és számítás eredményeit a **6.10.** és **6.11. ábrák** mutatják. A mérés és a számítás egészen jó egyezést mutat, figyelembe véve diagram léptékét. Itt is az eltérések legnagyobb értékei csak 0,5-1,5°C-ot mutatnak.

Továbbiakban vizsgáljuk meg a zöldtetők építésének előnyeit, hátrányait.

## 7. Zöld tetők bekerülési költségei, megtérülés, környezeti előnyök

A zöld tetők építése a mai támogatási rendszer mellett általában nagyobb beruházási költséggel jár, mint egy hagyományos lapostető vagy egy nyeregtető építése. Hasonló a helyzet, mint a megújuló energiatermelés esetében. Az utóbbi időben tapasztalható olaj és gázár csökkenés mellett - de még korábban is a magasabb olajárak esetében is így volt - a megújuló energiatermelési módok legtöbbször drágább energiát eredményeznek a hagyományosnak számító fosszilis energiahordozókból termelt energiáknál. Ha viszont a zöldtető építésben is hasonló támogatási formákat dolgoznak ki a kormányzatok, mint a megújuló energiatermelés esetében tették és teszik, akkor a zöldtető építés is rentábilissá válhatna. Ha zöld tető építésnél is a hosszabbtávú célokat is figyelembe vesszük, akkor annak előnyeit is láthatjuk.

Idézem Pál László [58] által a Levegő Munkacsoport honlapján található tanulmányának főbb gondolatait, amelyben ezeket a szempontokat felsorolja.

### Gazdasági előnyök

A területfejlesztés gazdaságtana gyakran olyan struktúrák kialakítását szorgalmazza, amik kisebb építési költséggel létrehozhatók, bár természetellenesek. Ezt a gondolkodásmódot meg kell változtatnunk és több figyelmet kell szentelnünk környezetünk jövőjére. Kezdetben több anyagi áldozatot kell vállalni az építkezéseknél, amik a későbbiekben ökológiai és gazdasági megtakarításokat fognak eredményezni. A zöldtető és zöldhomlokzat létesítésének magasabb költségei hosszú távon energia és fenntartási költség megtakarítást eredményeznek. A gazdasági előnyök fontos érvek amellett, hogy a tulajdonosok a zöldtető kialakítása mellett döntsenek.

Nyáron az erős sugárzás miatt a csupasz tetők felszínén a hőmérséklet akár 80°C fölé is emelkedhet, míg a téli felhőmentes éjszakákon -20°C alá csökken. A nagy napi és évi hőingás miatt a tetőszerkezetekben jelentős károk keletkezhetnek. A tető szigetelésére használt anyagok élettartama zöldtető alkalmazásakor megnövekszik. A tetőszerkezet védelme miatt csökken az ultraibolya sugárzás, a hőingadozás és a mechanikai sérülések miatt bekövetkező károk nagysága. A növényekkel beültetett területek sokkal kevésbé melegszenek fel nyáron. Zöldtetők alkalmazásával elérhető 3–7°C-os csökkenésével, a klímaberendezések használata 10%-kal mérsékelhető. Egy egyszintes zöldtetős épületnél a hűtés költségei átlagosan 25%-kal csökkenthetők. A Weston Design Consultants cég tanulmánya szerint Chicago városában 100 ezer USA dollár értékű energia lenne megtakarítható, ha az összes tetőt növényekkel ültetnék be. A nyári energia-fogyasztási csúcs 720 MW teljesítménnyel csökkenne, ami egy kisebb atomerőmű, vagy néhány szénerőmű termelésének felel meg. Az így megtakarítható energia több mint 3%-kal csökkentette volna a 2002-es 21.804 MW-os energiafogyasztási csúcsot.

A tetőkhöz hasonlóan a déli, nyáron erősen felmelegedő falakon igen fontos a napsugárzás elleni védelem, télen viszont az a kedvező, ha a falakat közvetlenül éri a napsugarak melegítő hatása. A lombzat a befuttatott faltól akár a beeső napsugarak 80%-át is távol tartja, így annak felszíni hőmérséklete a csupasz falnál akár 30°C-kal is kisebb lehet. A probléma legegyszerűbben a lombhullató vagy egynyári fajok alkalmazásával oldható meg. Északi falak esetén a napsugarak a falakat közvetlenül nem melegíthetik, így a jobb hőszigetelés érdekében célszerű az örökzöld fajok telepítése. Vizsgálatok szerint a fal külső felszínén a hőmérséklet a növényzet hatására átlagosan 2°C-kal lenne magasabb, és így akár 5–35%-os fűtési energia-megtakarítás is elérhető. A zajszigetelésben is lehetne eredményeket elérni a zöldtetők és zöld homlokzatok alkalmazásával. Ennek az előnynek a jelentősége a repülőterek, főút- és

vasútvonalak közvetlen közelében elhelyezkedő épületeknél a legnagyobb, hiszen itt jellemző az erős, zavaró hanghatás. Intenzív zöldtető alkalmazásával használható területeket nyerhetünk a városokban. Ezek segítségével parkokat, pihenő- és vendéglátóhelyeket lehet létrehozni a már sűrűn beépített belvárosi területeken is. A zöldtetők kialakításához használt anyagok jelentős része újrafelhasznált anyag, így a nyersanyag megtakarítása mellett a hulladékkezelési-infrastruktúra igény is alacsonyabb szinten marad. A zöldtető kialakítása és kezelése lényegesen több élőlétszámot igényel, mint egy hagyományos tető. Így szerepe lehet új munkahelyek kialakításában, a munkanélküliség csökkentésében. Németországban jelenleg körülbelül 12 ezer ember dolgozik a tetőfedési szektorban, míg ha az összes lapostetőre növényeket telepítenének az alkalmazottak száma közel tízszeres lenne.

A zöldtetők bekerülési költségeit néhány hazai és külföldi példán keresztül mutatom be. Melyekből az derül ki, hogy, mint minden más termék esetében is széles skálán mozognak a bekerülési költségek.

A zöldtető építésének költségeire a Zöldtetőépítők honlapján [80] találtam értékes információkat.

### **Milyen zöldtetőt építsünk? [80]**

Először azt kell eldöntenünk, hogy extenzív vagy intenzív kertet kívánunk-e telepíteni, és hogy újépítésű vagy már régi tetőre akarunk zöldtetőt helyezni. Hiszen az intenzív kert nagyobb többletterhet jelent a lapostetőnek, ezért meg kell győződnünk arról, hogy a tető mekkora rétegvastagságot bír el, valamint, hogy mekkora a felület lejtése. Rendszeres tartózkodásra nem alkalmas természetes zöldtetőt 0-25° lejtésszögű tetőn, míg állandó tartózkodásra is használható tetőkert csak közel sík (1,5-5% lejtésű) tetőszerkezeten tudunk kialakítani. A zöldtetők súlya négyzetméterenként 0,5-2,0 kN között mozog, míg a tetőkertek súlya jóval nagyobb, 2,5-15 kN/nm.

### **Mennyibe kerül?**

Egy zöldtető megépítése annyira speciális és egyedi feladat, hogy nem könnyű meghatározni az árakat. Átlagban azonban akár régi, akár újépítésű társasházról van szó, az extenzív zöldtető négyzetmétere komplexen, mindent beleszámítva nagyjából 10-15 ezer forintba kerül. Ebből körülbelül minimum 4-5 ezer forint/m<sup>2</sup> a szigetelési munka, míg a kertépítés minimum 5-6 ezer forint/ m<sup>2</sup>. Családi házak esetén is hasonló árakkal találkozhatunk, itt talán az anyagmozgatás fajlagos költsége drágább - kalkulál Bellavics László zöldtető-szakértő, a zoldtetoguru.hu üzemeltetője. Az intenzív kert költsége ellenben csupán fantázia és pénztárca kérdése, hiszen szinte bármit telepíthetünk: játszóteret, golfpályát vagy akár tenispályát is. Itt az árak 15 ezer forint/ m<sup>2</sup>-nél - szigeteléssel 20 ezer Ft/ m<sup>2</sup> - kezdődnek, és a határ a csillagos ég.

Egy amerikai tanulmány szerint a következő árakkal kalkulálhatunk zöldtető létesítése esetén [85].

Zöld tetők költségei az Egyesült Államokban a becslések szerint átlagosan 15\$ és 20 \$ között mozog négyzetlábra vonatkoztatva, ami átszámítva kb. 150 és 200 dollár /m<sup>2</sup> árnak felel meg. Az átlag tartalmazza a különböző típusú épületek költségeit, lakossági épületeket, kereskedelmi és ipari létesítményeket stb. Ezek a költségek tartalmazzák a tetőszerkezet, a vízszigetelés, a drenázs, a talaj és a növényzet telepítésének költségeit is. A zöldtető projektek költségeit növelik a szállítással, az építéssel kapcsolatos költségek, valamint egyéb berendezések pl. öntöző berendezések stb. Az árat nagymértékben növelheti, ha egyedi növényzetet telepítenek a tetőre.

Található még olyan Excelben írott zöldtető kalkulátor is, amelyben különböző szempontok

és igények figyelembe vételével saját magunk is kiszámíthatjuk a bekerülési költségeket. Természetesen Egyesült Államokbeli árakon. Zöldtető kalkulátor [79].

És végül egy teljesen **konkrét példa**, amelyet szintén egy Egyesült Királyság területén 2012-ben készült zöldtető költségeiről közölt a tulajdonos, melynek fényképét is közzétette, amit a **7.1. ábrán** láthatunk.

A 10ft x 8ft területű melléképület tetejét alakította át zöldtetővé, melynek területe 8 négyzetméter. A tető meredeksége kisebb, mint 3 fok, ezért négy réteg anyagot használt a zöld tető megépítéséhez.

**Védőfólia**, ami megvédi a vízszigetelő réteget a gyökerek okozta sérülésektől, a **vízvezető** réteg, a **drenázs** réteg, amely a nedvességet tárolja, és az **ültetőközeg**. Ezek alapján feltételezhetően a régi lapostető meglévő szerkezetét nem változtatta meg az építés során. Egyszerűen rátelepítette a zöldtetőt. A teljes bekerülési költség 412,08 font, ami tartalmazza az ÁFÁ-t is. A költségek 2012-es árakon Bristol körzetében értendők.



**7.1. ábra** Egy elkészült zöldtető [86]

## 8. Összegzett következtetések

A kutatásaim során a következő célokat tűztem ki, illetve azokat lehetőségeimhez képest meg is valósítottam:

- Elvégeztem a zöldtető rétegrend (vegetáció és szubsztrát) lefolyásvizsgálatát irodalmi adatok alapján ennek részleteit a függelékben közöltem.
- Egy adott, korábban hasonló kísérleti célokra épített óvoda épület tetőszerkezetében módomban állt a zöldtető és a hagyományos lapostető energiaháztartásának vizsgálatára, melynek hőtechnikai méréseit az általam kifejlesztett mérőrendszerrel végeztem el, közel egy éven keresztül.
- Mérési módszert dolgoztam ki a zöldtető és a betontető szerkezetben lejátszódó hőmérséklet-viszonyok vizsgálatára
- A kétféle tetőszerkezetben lejátszódó hőmérséklet-változási folyamatokat tranziens numerikus szimulációs módszerrel követtem főként saját mérések felhasználása alapján.

A kutatásaim során, hogy a zöldtetők azáltal, hogy többletréteget képeznek az épületen és emellett vizet képesek rétegfelépítésük révén magukban elraktározni, rendkívül pozitív hatással vannak az épület energiaháztartására. Fontosnak tartottam, hogy részletesen megvizsgáljam, hogy a különböző zöldtető kialakítások hogyan viselkednek a fenti tekintetben. A kutatómunka célja volt, hogy összefoglaljam az eddigi külföldi és hazai kutatásokat és feltárjam azok eredményeit és hiányosságait, továbbá hogy olyan vizsgálatokat folytassunk, amelyek eredményeképpen olyan következtetéseket tudunk levonni, amelyek a további tervezések során hasznosíthatók lesznek.

A kutatás témáját képező zöldtetők viselkedését a kutatás során lakó- valamint egyéb rendeltetésű épületek tekintetében vizsgáltam meg. Részletesen vizsgáltam a zöldtetők hőháztartását, az egyes rétegekben kialakuló hőmérséklet eloszlásokat. Mérésekkel és számításokkal követtem egy adott zöldtető esetében a tetőszerkezet viselkedését, mind stacioner, mind tranziens hőtani folyamatokat vizsgáltam. Majd egy éven keresztül nyomon követtem egy általam kialakított mérőrendszer segítségével a tetőszerkezet egyes rétegeiben lejátszó hőtani folyamatokat. Az adott épület esetében módomban volt összehasonlítani a zöldtető és a hagyományosnak számító betontető hőtani viselkedését. Az épület ugyanis korábbi hasonló vizsgálatok céljából úgy lett felújítva, hogy egy része hagyományos betontető szerkezet, másik része pedig extenzív zöldtetővel rendelkező födémmel bír.

Az extenzív zöldtetők nagy előnye, hogy ha gondosan választjuk ki a talajkeveréket és a növényzetet, akkor alig igényel gondozást, ezért kiválóan alkalmazhatók az épületekhez.

A kutatás vezérvonala a következő: azt vizsgáltuk, hogy azáltal, hogy egy épületen zöldtető létesül, mennyi energia takarítható meg, illetve ez hogyan alakul az év különböző időszakában.

A célt egyrészt megvalósult épületen végzett mérések segítségével, másrészt pedig különböző számítógépes modell kísérletekkel valósítottam meg. A fizikai, matematikai és numerikus modell validálását a korábban egy középületen közel egy éven keresztül végzett mérésekkel hajtottam végre. Itt lehetőségem nyílt arra, hogy különféle időjárási viszonyok között zöldtetővel ellátott épület termikus viselkedését elemezni tudtam. Összehasonlítottam a zöldtető és a hagyományos lapos tető hőtani viselkedését.

A matematikai modell az irodalomban szokásos egyszerű matematikai modell helyett az



épület strukturális felépítését nagy pontossággal követte, például a födém rétegrendjét a legapróbb részletekig figyelembe vettem. Az épületek szokásos hőtechnikai számításainak részletességén messze túlmutat az itt alkalmazott eljárás. A számítási modell más területen is előrelépést jelent a hagyományosnak számító hőveszteség vagy hőnyereség számításokhoz képest. A hagyományos számítások általában stacioner hőmérséklet mezőt számítanak. A szerkezeti elemek hőtehetetlenségét kevéssé veszik figyelembe. A kifejlesztett számítógépes szimulációban tranziens hőveszteség és hőnyereség számítást is modelleztem.

A födémekben lejátszódó, időben változó hőmérséklet mezőt részletesen elemeztem, mind a mérések, mind a számítások alapján. Elemeztem a födémekben kialakuló hőmérsékletmezőt abból a szempontból, hogy mennyire tekinthető azok lefutása periodikusnak, illetve mennyire lehet hosszabb idő átlag értékeit energetikai számításokra felhasználni.

A hőmérséklet jelek Fourier-transzformálása révén a periodikusságot számszerűsíteni tudtam. A kapott eredményeim alapján a nyári viszonylag nagy napi hőingadozás esetében a periodikusság nagyon jól kimutatható. A mért és számított hőmérséklet görbék a tetőszerkezet különböző rétegeiben a Fourier-sor első 1-2 tagjával nagyon jól megközelíthető. A napi periodicitás nagyon jól látható. A téli vagy kis napi hőingadozású időszakokban viszont még hosszabb idő (1hét 10 nap) esetében sem sikerült kimutatni a periodicitást. Az ilyen hőmérséklet-függvények a Fourier-sor 4-5 tagjának figyelembe vételével sem adott kellően pontos közelítést.

A hőtechnikai számításokban, méretezésekben mind a téli, mind a nyári időszakban a hőveszteséget és a hőnyereséget is átlagos belső és külső hőmérsékletek alapján végezzük. A mérési és számítási eredményeim szerint a nyári időszakban nehéz olyan egyértelmű hosszabb időszakot találni amelyből egyértelműen lehetne az épületre hőnyereséget számolni.

A mérések alapján ennek egyik fő oka az volt, hogy pl. a napi átlagokból képzett hőmérsékletek alapján a hőáramlás iránya is több esetben olyan volt, hogy mind a belső térből, mind a külső térből a hő a födém belseje felé áramlott. Nyilván az csak bizonyos ideig néhány napig vagy hétig áll fenn. Ez az épület falszerkezetétől és főként a födém hőtehetetlenségétől függ. Vannak épületek, ahol a hőkécsleltetés fél évig is eltart. (Több méteres falak esetében pl. Vaszilij Blazsennij Katedrális esetében). A vizsgált időszakban több ilyen időszakot sikerült kimérnem és az adatok alapján a zöldtetős épületrész hosszabb ideig volt erre képes (ld. **4.25. ábra** zöldtető nyári átlagai), míg a betontetős félnél ez rövidebb időszakot mutatott. (ld. **4.24. ábra** betontető nyári átlagai).

A téli átlagokból képzett hőmérséklet lefutási diagramok nagyon jól használhatóak mind a hőveszteség számítására, mind pedig a talajréteg hővezetési tényezőjének közelítő meghatározására. (ld. **4.26. ábra** betontető téli átlagai, **4.27. ábra** zöldtető téli átlagai).

A zöldtető talajának - pontosabban a zöld tető egész rétegének, amiben a talaj, a növényzet, a talajnedvesség és a benne lévő levegő együttesen szerepel- a hővezető képességét a méréseim alapján jól ki tudtam számítani. De ez a módszer csak a téli időszakban mért adatokból volt lehetséges. A nyári és az átmeneti időszak adatai sajnos erre nem voltak alkalmasak, mert a hőáramlás még hosszabb idő átlagában sem volt egyértelmű.

Az időben változó hőmérsékletmezőt véges térfogatos analízisen alapuló ANSYS CFX programmal követtem nyomon. A belső térben és a tető felszínén uralkodó hőmérsékletekből valamint a födém szerkezetére vonatkozó anyagjellemzőkből (hővezetési tényező, hőkapacitás, sűrűség) felhasználásával kiszámítottam a födém szerkezet egyes réteghatárain a hőmérséklet időbeli alakulását. Ezeket az eredményeket összehasonlítottam a méréseimmel. Az egyezés elég jónak mondható. A számított értékek időbeli periodicitása nagyon jól követi a mérési eredményeket. A tényleges hőmérsékletek pedig nem térnek el 4-5°C értéknél jobban, még ott sem, ahol 50-60°C hőmérsékletek is fellépnek.

A talaj hővezetési tényezőjére alkalmaztam egy közelítést, amelyben eltérő hővezetési tényezőt számoltunk a nyári időszakra. Éjszakára nagyobb  $0,3 \text{ W/mK}$ , még nappalra kisebb,  $0,2 \text{ W/mK}$  értékkel számítottam ki a hőmérséklet mezőt. Ez a feltételezés a mérésekkel jobban egyező hőfokmezőt eredményezett. A megfontolás alapja az volt, hogy a napsugárzás hatására a növényzet párologtató és árnyékoló hűtő hatásának eredményeként a talaj felső rétege egy jobb hőszigetelő réteggé viselkedik. Míg éjszaka ez hatás nem érvényesül.

## 8.1. Új tudományos eredmények

### 1. Tézis:

Meglévő eredetileg energetikai kísérleti célokra megépített épület hőtechnikai vizsgálatára kifejlesztettem egy mérőrendszert. A korábban kísérleti céllal átalakított óvoda épület energetikai vizsgálatát, mérését végeztem a két párhuzamosan működő mérőrendszerrel. Az épület egy része extenzív zöldtetős, a másik része hagyományos lapos tetős födém szerkezet. A mérőrendszer által közel egy éven át gyűjtött adatok feldolgozása alapján közelítő számítással meghatároztam a zöldtető talajának hővezetési tényezőjét. A számított értékek a szakirodalomban megadott értékhatárok közé esnek, de inkább egy szárazabb talaj hővezetési tényezőjéhez áll közel az általam meghatározott érték. Ennek okát abban látom, hogy az adott zöldtető rétegben jelentős arányú a zöld növényzet és annak gyökérzete, amely befolyásolja a hővezetési tényező értékét.

### 2. Tézis

A mérőrendszerrel gyűjtött, időben változó hőmérséklet adatokat Fourier-analízisnek vettem alá. Ennek eredményeként azt találtam, hogy vannak az évnek olyan időszakai (téli időszak), amikor a napi periodicitás nem mutatható ki a hőmérséklet görbékből. A Fourier-analízisben nincsenek kiugró frekvenciák. A Fourier-sorral történő közelítés ilyen esetekben 4-5 tag esetén sem közelíti megfelelően a tényleges görbét. Vannak viszont bizonyos időszakok (nyári és átmeneti időszakok) amikor a periodicitás nagyon jól kimutatható. A Fourier-analízis a napi periodicitást a nyári és az átmeneti időszakban alátámasztotta. Ilyen esetben a Fourier-sorral történő közelítés már 1-2 tag esetében is jó közelítést ad.

### 3. Tézis

A hőtechnikai számításokban, méretezésekben mind a téli, mind a nyári időszakban a hőveszteséget és a hőnyereséget is átlagos belső és külső hőmérsékletek alapján végezzük. A mérési és számítási eredményeim szerint a nyári időszakban nehéz olyan mértékadó hosszabb időszakot találni, amelyből egyértelműen lehetne az épületre hőnyereséget számolni.

A mérések alapján ennek egyik fő oka az volt, hogy pl. a napi átlagokból képzett hőmérsékletek alapján a hőáramlás iránya is több esetben olyan volt, hogy mind a belső tértől, mind a külső tértől a hő a födém belseje felé áramlott. A munkám során több ilyen időszakot sikerült kimérnem és az adatok alapján a zöldtetős épületrész hosszabb ideig volt erre képes (ld. **4.25. ábra** zöldtető nyári átlagai), míg a betontetős félnél ez rövidebb időszakot mutatott. (ld. **4.24. ábra** betontető nyári átlagai)

A téli átlagokból képzett hőmérséklet lefutási diagramok nagyon jól használhatóak voltak mind a hőveszteség számítására, mind pedig a talajréteg hővezetési tényezőjének közelítő meghatározására. (ld. **4.26. ábra** betontető téli átlagai, **4.27. ábra** zöldtető téli átlagai).

### 4. Tézis

Az időben változó hőmérsékletmezőt véges térfogatú analízisen alapuló ANSYS CFX programmal követtem nyomon. A belső térben és a tető felszínén uralkodó hőmérsékletekből valamint a födém szerkezetére vonatkozó anyagjellemzőkkel (hővezetési tényező, hőkapacitás, sűrűség) kiszámítottam a födém szerkezet egyes réteghatárain a hőmérséklet

időbeli alakulását. A számításaim során a födém geometriai szerkezetét gondosan modelleztem, ami a szakirodalomban nem szokásos eljárás. A számítási eredményeimet összehasonlítottam a méréseim eredményeivel, az egyezés jónak tekinthető. A számított értékek időbeli periodicitása nagyon jól követi a mérési eredményeket. A tényleges hőmérsékletek pedig nem térnek el 4-5°C értéknél jobban, még ott sem, ahol 50-60°C hőmérséklet különbségek is előfordulnak a számításokban. (ld. **6.6. ábra 6.8. ábra**).

## 5. Tézis

A talaj hővezetési tényezőjének napszakon belüli változtatását alkalmaztam a numerikus számítások során. Közelítésként eltérő hővezetési tényezőt számoltam a nyári időszakra a nap különböző szakaszaiban. Éjszakára nagyobb, 0,4 W/mK, míg nappalra kisebb, 0,2 W/mK értékkel számítottam ki a hőmérsékletmezőt. Ez a feltételezés a mérésekkel jobban egyező hőfokmezőt eredményezett. A megfontolás alapja az volt, hogy a napsugárzás hatására a növényzet párologtató és árnyékoló hűtő hatásának eredményeként a talaj felső rétege egy jobb hőszigetelő réteggé viselkedik. Míg éjszaka ez a hatás nem érvényesül. A jobb közelítő számítási eredményt a **6.8. ábra** mutatja a **6.6 ábrához** képest

## 8.2. Az eredmények hasznosítási lehetősége

A kutatásokból kapott eredmények remélhetőleg segítik a hazai zöldtető tervezés és alkalmazás fejlődését, és a városi környezetben megvalósuló szerkezetek vizsgálati módszereit és adatait felhasználva, egyéb épületei számára is többletet nyújtanak. A cél az, hogy megmutassam, hogy célszerű a zöldtető készítése az épületekre, jobban is működhet, mint egy hagyományos fedés. Az eredményeim alapján a zöld tetők előnyei főként a nyári időszakban mutatkoznak meg. Ekkor ugyanis az épületbe jutó hőmennyiség jelentősen csökken a zöldtetőn lévő növényzet párologtató hatása miatt. A téli időszakban is fűtési energia megtakarítást jelent a zöldtetős fedés. A zöldtetők csapadék lefolyás vizsgálata is hasznos ismereteket tartalmaz a település fejlesztő mérnökök számára, akik a közművek, főként a csatornázás fejlesztését korszerűsítését végzik egy adott településen. A zöldtetők egyéb környezetre gyakorolt pozitív hatásait már több helyen is összefoglaltam.

## Irodalomjegyzék

- [1] **Alexandri, E. and P. Jones, (2007):** Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roof on the built environment: Comparison with experimental results. *Building and Environment*, pp. 2835-2849.
- [2] **Amrein, H., 1997:** Wasserrückhaltevermögen von Dachbegrünungen, wasser, energie, luft- eau, énergie, air 89, Heft 5-6/97, Svájc, 1997, pp.120-120.
- [3] **Austrotherm Akadémia: Zöldtetők** Ez az írás az Austrotherm Akadémia 3. évfolyamában jelent meg a honlapunkon, **Horváthné Pintér Judit**  
[http://www.austrotherm.hu/upload/austrotimes/austrotimes\\_2008\\_tavaszi.pdf](http://www.austrotherm.hu/upload/austrotimes/austrotimes_2008_tavaszi.pdf)
- [4] **Barrio, E.P.D., (1998):** Analysis of green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, pp. 179-193.
- [5] **C. Y. Jim, S. W. Tsang, (2011):** Modeling the heat diffusion process in the abiotic layers of green roofs, *Energy and Buildings* 43 1341-1350.
- [6] **DFT - Trigonometric Representation**  
<http://www.spiderfinancial.com/support/documentation/numxl/users-guide/spectral-analysis/discrete-fourier-transform-dft/dft-trigonometric-representation?gclid=COjWrp-hls4CFUKZGwodYP4DdQ>
- [7] **D. J. Sailor, (2008):** A green roof model for building energy simulation programs, *Energy and Buildings* pp.1466-1478.
- [8] **FLL (2002): Zöldtetők tervezési, kivitelezési és fenntartási irányelve – Zöldtetők irányelve – Magyar kiadás, ZMS kft.**
- [9] **Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau FLL 1995 5.1.1**
- [10] **FLL 1995 6.1.1**
- [11] **FLL 2002, 9.2.7.**
- [12] **FLL 2002, 6.3.1**
- [13] **FLL 2002, 6.4.1.**
- [14] **FLL 2002, 7.2.1.**
- [15] **FLL 2002, 9.2.8.**
- [16] **FLL 2002, 13.1.]**
- [17] **F. Olivieri, C. Di Perna, M. D’Orazio, L. Olivieri, J. Neila, (2013):** Experimental measurements and numerical model for the summer performance of extensive greenroofs in a Mediterranean ancoastal climate, *Energy and Buildings* pp. 1-14.
- [18] **Gerzson László, Hidy István, Prekuta János (2011):** A zöldtető - A városi tetőtáj koronája, Érc kft. Budapest
- [19] **G. Kotsiris, A. Androutopoulos, E. Polychroni, P. A. Nektarios (2012):** Dynamic U-value estimation and energy simulation for greenroofs, *Energy and Buildings* 45 pp. 240-249.
- [20] **Hidy I., Prekuta J., Varga G., (1995):** Flóratetők Tervezési és kivitelezési szempontjai, proNatur Kft, Budapest
- [21] **Hien, W.N., T.P. Yok, and C. Yu., (2007):** Study of thermal performance of extensive roof top greenery systems in the tropical climate. *Building and Environment*, pp. 25-54.
- [22] **Horváthné Pintér Judit (szerk.) (2005):** Zöldtetők tervezési és kivitelezési irányelvei, 2005: Második változatlan utánnnyomás, ÉMSZ
- [23] **Köhler, M., (2004):** Energetic Effects of Greenroof system on the Urban Climate tenearto the ground, *IGRA-Proceedings*, 2004, pp. 72-79.
- [24] **Köhler, M., (2009):** Energetic aspects of greenroofs, *World GreenRoofCongress*,

- Conferencetranscript, Berlin, pp. 79-86.
- [25] **Kaufmann, P., 1998:** Positive Auswirkungen auf die Siedlungswasserwirtschaft. Versuche mit extensiv begrünten Flachdächern an der Ingenieurschule Burgdorf (ISB), Der Gartenbau, 11/98, Svájc, pp. 20-22.
- [26] **Kolb, W., 1987:** Abflußverhältnisse extensiv begrünten Flachdächer, Schweizerische Technische Zeitschrift, 5/98, pp. 14-15.
- [27] **Liesecke, H.-J., 1988:** Untersuchung zur Wasserrückhaltung bei extensiv begrünten Flachdächern, Zeitschrift für Vegetationstechnik 11, 4-6/88, pp. 56-60.
- [28] **Liesecke, H.-J., 1989:** Wasserrückhaltung und Abflußspende bei Extensivbegrünungen auf Flachdächern, BBauBl, Heft 4/89, pp.176-183.
- [29] **Liesecke, H.-J., 1991:** Eine Bauweise für extensive Dachbegrünungen, Duetscher Gartenbau 38, 47/91, pp. 2936-2940.
- [30] **Liesecke, H.-J., 1993:** Die Wasserrückhaltung bei extensiven Dachbegrünungen. Ergebnisse mehrjähriger Freilandversuche mit 26 Bauweisen am Standort Hannover-Herrenhausen, Das Gartenamt 42, 11/93, pp. 728-735.
- [31] **Liesecke, H.-J., 1994:** Dränverhalten extensiver Dachbegrünungen, Einfluß der Durchwurzelung bei mehr- und einschichtigen Bauweisen auf dem Wasserabfluß, Das Gartenamt 43, 7/94, pp. 451-455.
- [32] **Mendel, H. G., 1985:** Die Bedeutung von Gründächern insbesondere aus wasserwirtschaftlicher Sicht, Das Gartenamt 34, 8/85, pp. 574-581.
- [33] **ATV, (1994):** ATV – Handbuch, Planung der Kanalisation, 4, Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1995
- [34] **Di Gléria J., Dvoracek, M. et. al., (1957):** Talajfizika és talajkolloidika, Akadémiai Kiadó, Budapest
- [35] **Diestel, H. u. M. Schmidt, (1997):** Dachbegrünung und Regenwassernutzung zum Schutz der Oberflächengewässer, Faltblatt Institut für Landschaftsentwicklung, Fachgebiet Wasserhaushalt und Kulturtechnik, TU Berlin, 1997
- [36] George Lungu „excelunusual.com”  
<https://www.youtube.com/watch?v=5IOB2NKTOS0>
- [37] **Gordon McIntosh, Brenton S. Harratt (2001):** Thermal properties of soil, The Physics Teacher, Vol. 39., 2001
- [38] **Gróf Gyula (2012) :**Höközlés <ftp://ftp.energia.bme.hu/pub/Tananyagok-archivuma/Egyetemi-kepzes/Muszaki-hotan-II-BMEGEEN3034/hokozles.pdf>
- [39] **Hegemann, W. u. W. Müller, (1994):** Messungen von Menge und Qualität der Abflüsse eines begrünten und eines unbegrünten Daches im Märkischen Viertel, TU Berlin. Institut für Technischen Umweltschutz, Fachgebiet Wasserwirtschaft, Berlin, 1994, pp. 26.
- [40] **Kantitub Tubswan and Phil Banfill (2014):** Present problems with building performance simulation of green roofs ; ICBEST 2014 June 09-12, 2014, Aachen, Germany  
[https://pureapps2.hw.ac.uk/portal/files/7439596/TubswanBanfill2014\\_postprint.pdf](https://pureapps2.hw.ac.uk/portal/files/7439596/TubswanBanfill2014_postprint.pdf)
- [41] **Kanthleen M. Smizh et al. (2009):** Determination of the thermal conductivity of sand under varying moisture, drainage/wetting, and porosity conditions – applications in near – surface soil moisture distribution analysis, Hydrology Days, pp. 57-65., 2009.
- [42] **Köhler, M., (2005):** Urban storm water management by extensive green roofs, World Green Roof Congress, Conference transcript, Basel, Svájc, 2005, pp. 150-156.
- [43] **Köhler, M., M. Schmidt, M. Laar, et.al., (2002):** Photovoltaik-Panels on Greened roofs. Rio 02 - World Climate & Energy Event, Proc., Brazil, pp. 151–158.

- [44] **Köhler, M., M. Schmidt, and M. Laar, (2003):** Green roofs as a contribution to reduce the urban heat islands. *In: Rio3.com: Proc. Krauter (ed.): World Climate & Energy Event. 1. 5. Dez. in Rio de Janeiro*, pp. 493-498.
- [45] **Kolb, W., (1987) :** Abflußverhältnisse extensiv begrünten Flachdächer, Schweizerische Technische Zeitschrift, 5/98, pp. 14-15.
- [46] **Kolb W., T. Schwarz, (1999):** Dachbegrünung intensiv und extensiv, Ulmer Eugen Verlag, Stuttgart
- [47] **Kolb, W., (2004):** Good reasons for roof planting – green roofs and rainwater, pp. 295-300.
- [48] **König, K. W., (2004):** Gründach mit Regenwassernutzung, IGRA Proceedings, pp. 30-33.
- [49] **Krupka, B. W., (1994):** Dachbegrünung, Pflanzen- und Vegetationsanwendung an Bauwerken, 1. Auflage, Ulmer Verlag, Stuttgart
- [50] **Lazzarin RM, Castellotti F, Busato F.(2005):** Experimental measurements and numerical modelling of a green roof energy Buildings. 37, 126
- [51] **Lösken, G., (1994):** Druckrohrentwässerung bei Dachbegrünungen. Diskussionsbeitrag zu Fragen die in der Planungs und Ausführungspraxis aufgetreten sind. Das Gartenamt 43, 7/94, S. 456-462
- [52] **Marsh, P., (1984):** Hőszigetelés és kondenzáció, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [53] **Minke, G., (2000):** Dächer begrünen einfach und wirkungsvoll, Ökobuch Verlag, Freiburg, 2000, pp. 21-22.
- [54] **MSZ EN 12056-3:2001:** Gravitációs vízelvezető rendszerek épületen belül. 3. rész: Csapadékvíz-elvezetés, kialakítás és számítás  
[http://konyvtar.uni-pannon.hu/doktori/2013/Arpad\\_Istvan\\_dissertation.pdf](http://konyvtar.uni-pannon.hu/doktori/2013/Arpad_Istvan_dissertation.pdf)
- [55] **Nagy Vilmos:** Termőhely-specifikus növénytermesztés hidrológiai alapjai, különös tekintettel Csallóközre és Szigetközre PhD értekezés, Nyugat-magyarországi Egyetem Mosonmagyaróvár [http://doktori.nyme.hu/61/1/de\\_1032.pdf](http://doktori.nyme.hu/61/1/de_1032.pdf)
- [56] **Niachou, A., K. Papakonstantinou, M. Santamouris et. al., (2001):** Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. Energy and Buildings, pp. 719-729.
- [57] Országos Meteorológiai Szolgálat honlapja: Mérési adatok és napi adatok feldolgozása [http://owww.met.hu/eghajlat/eghajlati\\_adatsorok/de/Navig/103.htm](http://owww.met.hu/eghajlat/eghajlati_adatsorok/de/Navig/103.htm)
- [58] **Pál László:** Zöldtetők és zöldhomlokzatok , Lélegzet alapítván, Levegő Munkacsoport  
<https://www.levego.hu/sites/default/files/kiadvanyok/zoldtetotanulmany.pdf>
- [59] **Renato M. Lazzarin, Francesco Castelotti, FilippoBusato, (2005):** Experimental measurements and numerical modelling of a greenroof, Energy and Buildings 1260-1267.
- [60] **Richard K. Sutton:** Green Roofs Ecosystems ISBN 978-3-319-14982-0 ISBN 978-3-319-14983-7 (eBook) Springer 2015 Swizerland
- [61] **Robert W. Peters, Ronald D. Sherrod and Matt Winslett:** Energy SavingsResultingfromInstallation of an ExtensiveVegetatedRoof System on a Campus Building in the Southeastern United States
- [62] **Roth-Kleyer, S., (2004):** Wasserhaushalt und Abflussverhalten von Gründachern, IGRA Proceedings, pp. 80-88.
- [63] **Roth-Kleyer, S., (2009):** Green roofs as a Module of Urban Water Management, IGRA Proceedings, pp. 63-71.
- [64] **Saiz-Alcazar, S. and B. Bass. (2005):** Energy Performance of Green Roofs in a Multi Storey Residential Building in Madrid. Greening Rooftops for Sustainable Communities, pp. 569-582.
- [65] **S. Bochner, K. Chandrasekharan:** *Fourier Transforms.* Princeton Book Comp.

- Publ., 2001, [ISBN 0-691-09578-7](#).
- [66] **Scheffer, F. u. P. Schachtschabel, (1976):** Lehrbuch der Bodenkunde, 9, Auflage, Ferdinand Enke Verlag
- [67] **Schmidt, M., (1992):** Extensive Dachbegrünung als Beitrag zur Verbesserung des Stadtklimas, Diplomarbeit am Fachbereich Landschaftsentwicklung der TU Berlin, 1992
- [68] **Seppo Louhenkilpi, Felde Imre (2011):** Anyagtudományi folyamatszimuláció [http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0036\\_AFS\\_hoatadas\\_modellezese/a\\_hvezets\\_differencilegyenletnek\\_analitikus\\_megoldsa\\_1.html](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0036_AFS_hoatadas_modellezese/a_hvezets_differencilegyenletnek_analitikus_megoldsa_1.html)
- [69] **Sikora and Kossowski, (1999):** Thermal conductivity and diffusivity estimations of uncompacted and compacted soils using computing methods. Polish J. SoilSci., 26(1), 19-26, 1993.
- [70] **Stefanovits P., Filep Gy., Füleky Gy., (1999):** Talajtan, 4. átdolgozott, bővített kiadás, Mezőgazda Kiadó, pp. 131-190.
- [71] **Stefanovits Pál, Filep György, Füleky György (2011):** Talajtan, Mezőgazda Kiadó 2011  
[http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/2011\\_0001\\_521\\_Talajtan/ch08s04.html](http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/2011_0001_521_Talajtan/ch08s04.html)
- [72] **Stoyan Gisbert- Takó Galina (2005):** Numerikus módszerek 1. Elektronikus tankönyvtár  
<http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/numerikus-modszerek-1/index.html>
- [73] **Sunday E. Etuk, Idara O. Akpabio, E.M. Udoh (2003):** Comparision of the thermal properties of clay samples as potential walling material for natural clay cooled building design, Journal of environmental sciences, Vol. 15, No. 1. pp.65-68, 2003
- [74] **Szlivka Ferenc (1999):** Áramlástan, Gödöllő, 1999, 227 p.
- [75] **Szlivka Ferenc (2014):** Hő- és áramlástechnika Budapest: Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, 2014. 242 p. (ÓE-BGK-2059)
- [76] Talaj hővezetési tényező mérése <https://www.mfgi.hu/en/node/321>
- [77] **Uowicy Boguslaw, Uowicz Lukasz (2004):** Thermal conductivity of soils comparison of experimental results and estimation methods, Eurosoil conference, 2004
- [78] **Wong, E. (2005):** Green roofs and the Environmental Protection Agency's heat island reduction initiative. pp. 32-44
- [79] **Zöldtető kalkulátor** <http://greenroofblocks.com/price-calculator/>
- [80] Zöldtető építése: mennyibe kerül és mire kell figyelni?  
<http://www.epitinfo.hu/index.php/articles/106/83199/zoldteto-epitese-mennyibe-kerul-es-mire-kell-figyelni>
- [81] **Zsuffa István, (1996):** Műszaki hidrológia I., Műegyetemi Kiadó, 1996, pp. 48. és pp. 227-236.
- [82] <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/AlkalmazottEsVarosklimatologia/ch12s03.html>
- [83] <http://slideplayer.hu/slide/2063835/>
- [84] <http://www.zoldtetoepites.hu/>
- [85] [http://www.lid-stormwater.net/greenroofs\\_cost.htm](http://www.lid-stormwater.net/greenroofs_cost.htm)
- [86] <http://www.enviromat.co.uk/blog/green-roof-cost/>
- [87] [http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017\\_09\\_napenergia/ch01.html](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_09_napenergia/ch01.html)



## Publikációs lista

### Folyóirat cikkek

- [A1] **Szlivka F. Dániel** , Zachár András (2014): Zöldtető és lapostető termikus mérése és számítása MAGYAR ENERGETIKA XXI:(2) pp. 16-20. (2014)
- [A2] **Szlivka F. Dániel** (2013): Zöldtetők energetikai jelentősége, különös tekintettel a talajréteg hőtechnikai paramétereire. Szolnoki Tudományos Közlemények XVII: pp. 88-96. (2013)
- [A3] **Szlivka F. Dániel** (2013): Saving Energy with Green Roofs by Measuring and Calculating the Thermal Parameters of Soil. Szolnoki Tudományos Közlemények XVII: pp. 97-103. (2013)
- [A4] Szabó Dániel , **Szlivka F. Dániel** (2010): Zöldtetők vízmegtartásának vizsgálata. ALAPRAJZ 2009/3: pp. 46-51. (2009)

### Konferencia kiadványok

- [B1] **Szlivka F. Dániel**, Rajnai Zoltán (2015): Saving energy with green roofs by measuring and calculating the thermal parameters of soil. Konferencia helye, ideje: Subotica, Jugoszlávia, 2015.09.17-2015.09.21. Subotica: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2015. 4 p.
- [B2] **Szlivka Dániel** , Zachár András (2015): Thermal measurement and calculation of green roof and normal flat roof. Tudományos hét a Dunaújvárosi Főiskolán , Gépészeti és anyagtudományi szekció , 2015. november 10. (2015)
- [B3] **Szlivka Dániel**, Szlivka Ferenc , Zachár András (2015): Zöldtető és betontető hőmérséklet eloszlásának elemzése. Tudományos hét a Dunaújvárosi Főiskolán, Gépészeti és anyagtudományi szekció , 2015. november 10. (2015)
- [B4] Albin Zsebik, **Dániel Szlivka** (2015): Green roof technology In: Green roof technology . Konferencia helye, ideje: Yerevan , Örményország , 2014 Yerevan: pp. 29-37.
- [B5] **Szlivka F. Dániel** (2014): Hőkomfort növelése zöld tetőkkel. Konferencia helye, ideje: Kecskemét, Magyarország, 2014.03.11-2014.03.14. Kecskemét: 2014. 6 p.
- [B6] **Szlivka F. Dániel** (2013): Energy saving with green roofs, including water retention and heat attenuation. Puskás Tivadar Hírmondó Bajtársi Egyesület Kiadványa 2013:(1) pp. 9-15. (2013) Kommunikáció 2013 nemzetközi tudományos-szakmai konferencia. Magyarország:
- [B7] **Szlivka F. Dániel** (2010): Examination of water retention and heat attenuation of green roofs Konferencia helye, ideje: Warsaw, Lengyelország, 2010.05.26-2010.05.28. Warsaw: 2010.
- [B8] **Szlivka F. Dániel** (2010): Examination of water retention and heat attenuation of green roofs. Examination of water retention and heat attenuation of green roofs . Konferencia helye, ideje: Warsaw , Lengyelország , 2010.05.26 -2010.05.28. Warsaw: pp. 251-257.

## Függelék 1. – Fogalom meghatározás

### 1.1. Fogalom meghatározás

A zöldtetők ökonómiai és ökológia tulajdonságai ma már a szakma középpontjába kerültek. Ezt leginkább Dr. H.-J Liesecke-nek köszönhetjük, aki ezt már korábban is felismerte és tudományos alapokra emelte. Az ő irányadó vizsgálatai meglepő eredményekre mutatattak rá, amik a közeljövőben be is bizonyosodtak. Liesecke után a következő paramétereket használjuk vízvizsszatartásnál.

#### 1.1.1. Lefolyási együttható

A lefolyási együttható és a C lefolyási tényező hányadosa egy olyan dimenzió nélküli mutató, amely a [54] DIN EN 12056-3 és DIN 1986-100 tervezet (eddig DIN 1986-2 volt ismert, ahol a görög  $\psi$  jelezte a lefolyási együtthatót) alapján kapcsolható a csapadékelfolyási (l/s) számításokba.

A zöldtető víztelenítésének méretezésekor a lefolyási együttható ( $\psi$ ) megadja az elvezetett  $VQ_r$  [m<sup>3</sup>] és a lehullott  $VR$  [m<sup>3</sup>] csapadék viszonyát. Ez vonatkozhat egy teljes esőzésre, egy esőzés szakaszára és több esőzés összességére is.

Lefolyási tényezőnek a nagyságát befolyásoló faktorok: hajlásszög, talajtípus, felület rögzítési módja, a terület jellege, talajfajta, kezdeti nedvességtartalom, hőmérséklet, csapadék időtartama és erőssége.

**F1. táblázat Zöldtetőknél az alábbi lefolyási tényezők (C) adódnak a rétegvastagság és a tetőlejtés függvényében:**

	<u>Tetőlejtés <math>\leq 15^\circ</math></u>	<u>Tetőlejtés <math>&gt;15^\circ</math></u>
50 cm rétegvastagság	C=0,1	
25-50 cm rétegvastagság	C=0,2	
15-25 cm rétegvastagság	C=0,3	
10-15 cm rétegvastagság	C=0,4	C=0,5
6-10 cm rétegvastagság	C=0,5	C=0,6
4-6 cm rétegvastagság	C=0,6	C=0,7
2-4 cm rétegvastagság	C=0,7	C=0,8

Ezen értékek is mutatják, hogy a lapostetőknél a csapadékvíznek csupán kis hányada az, amelynek elvezetéséről gondoskodni kell.

A fenti adatok a rétegrendre vonatkoznak egy adott nagyságú vízhozam mellett. Ennek átlagos értéke 300 l/(s\*ha).

A helyi csapadékhozam függvényében a lefolyási együttható magasabb és alacsonyabb értékeket is felvehet.

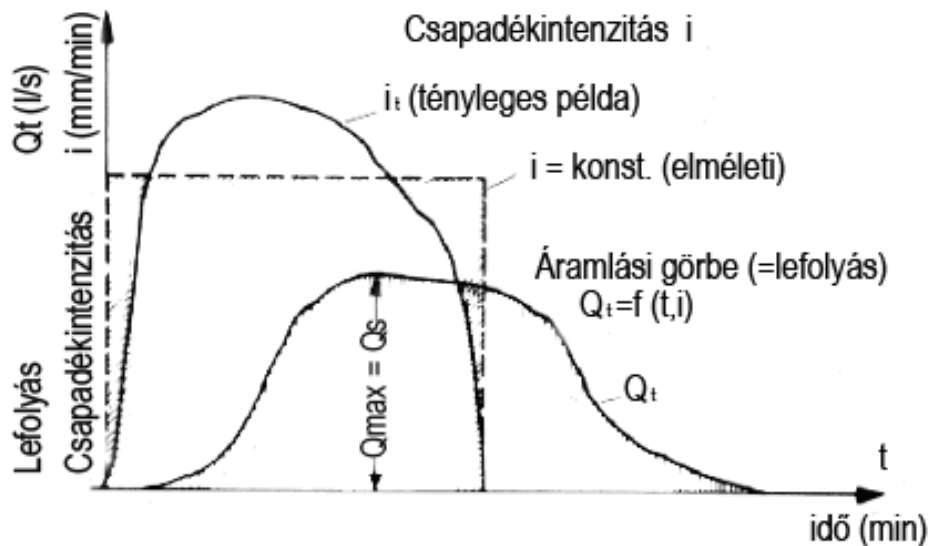
### 1.2. Maximális lefolyási tényező

Maximális lefolyási tényező  $\psi_s$  megadja az elvezetett vízhozam  $q_{r\ max}$  [l/(s\*ha)] és a lehullott  $r_{max}$  [l/(s\*ha)] vízhozam viszonyát egy egységesőzésnél. Ellentétben a természetes esőzéssel az egységeső egy modelleső konstansokkal, közepes esőintenzitással és megadott esőgyakorisággal:

1 órás időtartamú csapadékmennyiség 10, 15 és 20 mm

2 órás időtartamú csapadékmennyiség 20, 25 és 35 mm

$$\psi_s = \frac{\text{max. elvezetett vízhozam}}{\text{hozzátartó zóvízhozam}} = \frac{q_{\max}}{r_{\max}}$$



F1. ábra: Lehullott és elvezett vízmaximum [35]

A maximális lefolyási tényező megadja a legnagyobb fellépő vízlefolyást, ami a zöldsötöknél általában egy extrém csapadékhozam végénél alakul ki. Ez a tényező szolgál alapjául a csatornahálózat és a szivattyúteljesítmények méretezésekor is.

### 1.3. Átlagos lefolyási tényező

A tényező megadja az elfolyási volumen és a csapadékvolumen átlagviszonyát egy meghatározott időegységen belül.

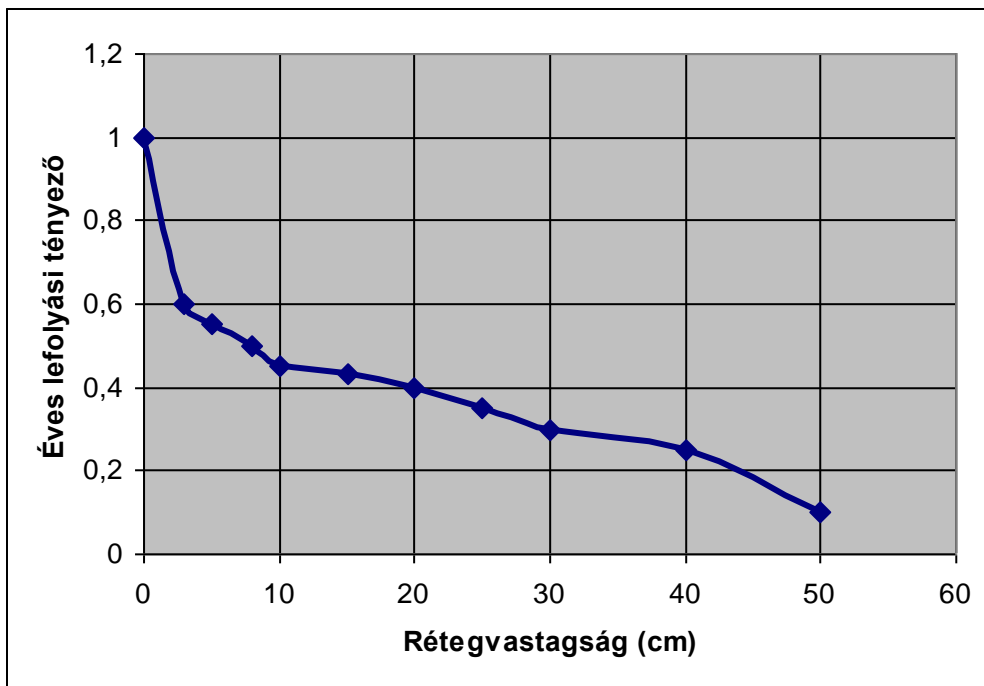
$$\psi_m = \frac{\text{elfolyásvo lumen}}{\text{csapadékvolumen}} = \frac{\int_0^T Q(t) * dt}{A * r * T}$$

Itt a megfigyelt időszakot nem kell csupán egyszeri eseményre vonatkoztatni, hanem egy hosszabb időintervallumra is vonatkoztathatunk. Így akár hosszabb (éves) időegységre vonatkoztatott tényezőt is kaphatunk. (ld.: éves lefolyási tényező)

A középértékű lefolyási tényező szolgál alapjául az esővízgyűjtő-medencék és azok szivattyúinak méretezéséhez, illetve az elfolyás és tározási volumenek meghatározásához.

### 1.4. Éves lefolyási tényező

Az Éves lefolyási tényező  $\psi_a$  megadja az elvezetett  $VQ_r$  [m<sup>3</sup>] és az éves lehullott  $VR$  [m<sup>3</sup>] csapadék viszonyát. Adatát ciszternák méretezéséhez használják.



F2. ábra: Éves lefolyási tényező a rétegvastagság függvényében

### 1.5. Összlefolyási tényező

Az összlefolyási együttható  $\psi_m$  megadja az elvezetett  $VQ_r$  [m<sup>3</sup>] és a lehullott  $VR$  [m<sup>3</sup>] csapadék viszonyát egy esőzésnek. Víz tározók méretezéséül szolgáló adat.

### 1.6. Véglefolyási tényező

A tényező a nem áteresztő felületek nagyságának méretét határozza meg. A nem áteresztő felületek nagysága  $A_u$ . A határolt felület ( $A_{bef}$ ) azon része, amely nem engedi a lehullott csapadékot elfolyani.

$$A_u = \psi_e \cdot A_{bef}$$

A véglefolyási tényező megadja, hogy a bruttó csapadék, egy meghatározott időegységben belül, mekkora százalékos értéke folyik el.

$$\psi_e = 1 - \frac{h_{\text{elszivárgás}}}{h_{\text{csapadék}}}$$

A fenti definíció az elfolyási hatékonyság mértékét adja meg egy áteresztő területnek. Ha nem áteresztő területről beszélünk, akkor ez az érték  $\psi_e = 1,0$ .

### 1.7. Maximális vízkapacitás

A maximális vízkapacitás a felépítményben alkalmazott anyagok telített állapotban mérhető legnagyobb vízfelvevő képességét mutatja, amit az anyag telítését követő, 2 óráig tartó kicsepegtetése után kapunk.

### 1.8. Vízáteresztő képesség ( $K_f$ modulus):

Megmutatja, hogy adott idő-, és hosszegység alatt a rétegrendbe beépített anyagok vízzel telített állapothoz milyen átfolyási érték tartozik.

## 1.9. Vízmeztartó képesség és éves lefolyási tényező

A vízmeztartó képesség százalékos értéke – tulajdonképpen a retenzió – az éves csapadékhozam, és az átlagos lefolyási mennyiség hányadosából adódik. A művelet inverzéből a DIN 4045 szerint adódik az éves lefolyási tényező  $\psi_a$ , mint az éves lefolyási mennyiség és az éves csapadékhozam hányadosa.

## 1.10. A vízmeztartó képesség mértéke

Az éves vízvisszatartás kevésbé függ az építésmódtól és rétegrendektől, mint a rétegvastagságtól. Kétségtelenül egyrészt az anyagspecifikus vízmeztartó képességet, másrészt pedig a vízáteresztő képességet vesszük számításba. A rétegvastagságbeli különbségek elsődlegesen a nyári időszakban jelentkeznek. Jóllehet a nyári időszakban sokkal több csapadék esik, a vízmeztartás jelentősen nagyobb, mint télen amikor a kevés a csapadékmennyiséghez a rétegrend alacsonyabb evaporációja, és a növények kisebb transzspirációja következtében a legnagyobb lefolyási arány tartozik.

Az alábbi táblázat tartalmazza a százalékos vízmeztartás hozzávetőleges értékeit 650-800 mm éves csapadékmennyiség figyelembevételével.

**F2. táblázat: Vízmeztartó képesség az ültetőközeg vastagságának függvényében**

Zöldtető fajták	Réteg-vastagság	Vegetációs forma	Vízmeztartó képesség középérték %-ban	Éves lefolyási együttható / beépítettségi faktor
Extenzív	2-4	Moha-Sedum	40	0,60
	4-6	Sedum-Moha	45	0,55
	6-10	Sedum-Moha-lágyszárúak	50	0,50
	10-15	Sedum-lágyszárúak-fűfélék	55	0,45
	15-20	Fűfélék-lágyszárúak	60	0,40
Intenzív	15-25	Gyep, évelők, fásszárúak	60	0,40
	25-50	Gyep, évelők, bokrok	70	0,30
	>50	Gyep, évelők, bokrok, fák	80	0,10

## 1.11. Evaporáció

A vízfelület és a nedves talajfelület közvetlen párologtatása.

## 1.12. Transzspiráció

A növényzet által felfogott csapadék párologása.

## 1.13. Evapotranszspiráció

Az evaporációból és transzspirációból, azaz a növényzet közötti fedetlen talajfelületről illetve a növényzetről való párologási értékekből származó összpárologás.

## 1.14. Intercepció

Az a vízmennyiség, amelyet a növényzet szélmentes időben maximálisan képes visszatartani, és átmenetileg tározni, majd elpárologtatni.

### **1.15. Hervadáspon**

A talajnak az a nedvességtartalma, amely  $1,5 \times 10^6$  Pa szívóerőnek képes ellenállni (ez az a szívóerő amit a növényi gyökerek még általában ki tudnak fejteni).

### **1.16. Ombrometer**

Csapadékmennyiség mérése ombrométerrel

Egy  $200 \text{ cm}^2$  felületű tölcser gyűjti az esőcseppeket. A vizet egy olyan speciális edénybe vezeti, amely minden egyes alkalommal billen egyet, amikor benne a vízmennyiség eléri a  $0.1 \text{ mm-t}$  ( $0.1 \text{ l/m}^2$ ). Ekkor az edény kiürül és ad egy impulzust. A beépített mikroprocesszor rögzíti és továbbítja az adatokat egy memóriaegységnek, majd ezek kiértékelésre kerülnek.

Az opcionális fűtés lehetővé teszi az egész évben történő használatot.

## Függelék 2. - Kísérleti eredmények

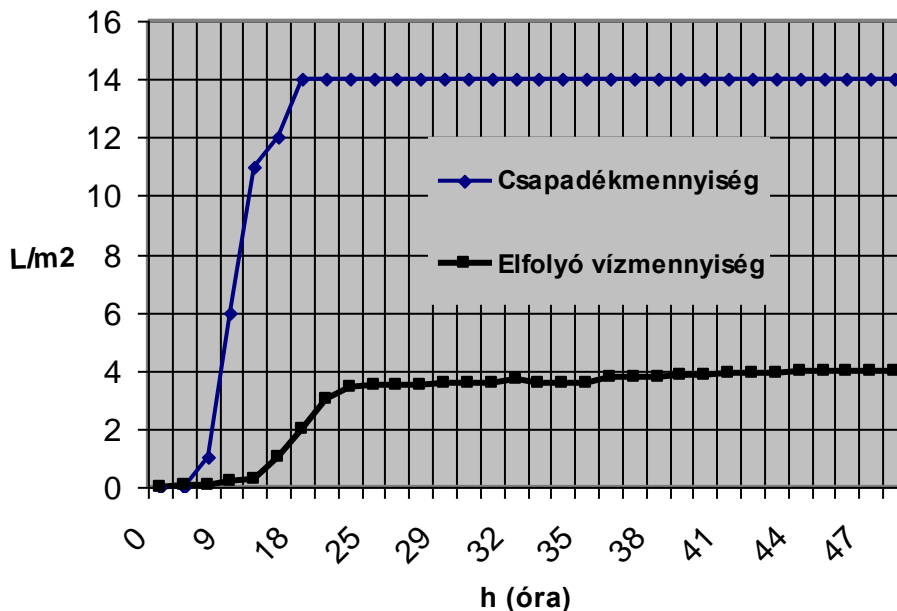
### 2.1. Csapadék-visszatartás

#### 2.1.1. Vízmegtartás jelentősége

Föld és duzzadó agyag keverékéből álló, 20 cm vastag ültetőközeg vízmegtartó képessége  $90\text{mm}=90\text{ L/m}^2$ , ami pl. a Németországban kb. 1 hónap alatt lehulló csapadékmennyiséggel azonos.

Nagy vízmegtartó képességük jóvoltából a flóratetők csökkentik a magas vízállást. A német előírások szerint a min. 10 cm vastag zöldtető csapadékvíz-visszatartó hányadosa 0,3, azaz a lehullott csapadékmennyiségnek csak nagyjából 30%-a folyik el, míg 70%-át a vegetáció megtartja, ill. elpárologtatja. Ezzel szemben a  $3^\circ$ -nál meredekebb lejtésű, hagyományos rétegfelépítésű tetők esetében a csapadékvíznek 100%-os elfolyásával kell számolni.

Németországi mérések szerint a csatornarendszer tehermentesítése szempontjából még ennél is fontosabb a csapadékvíz visszatartásának a késleltetése egy-egy nagyobb vihar után. Különösen, ha figyelembe vesszük, hogy a klímaváltozás során várhatóan gyakoribbá válnak az ilyen jellegű problémák. Ugyanis egyértelműen erre utal, hogy míg 1990-ben Budapesten lehullott éves csapadék 20%-a az esős időszak 1%-a alatt esett le, addig 2000-ben már 40%, és még nincs vége, 2004-ben a lehullott összes csapadéknak már több, mint 50%-a esett le az esős időszak 1%-a alatt. Egy  $12^\circ$ -os meredek zöldtetőn 14 cm vastag ültetőközeg esetén a 18 óra hosszan tartó heves esőzés utáni 12 órában mérték a (késleltetett) csapadékvíz-elszivárgást. A folyamat vége még ennél is később, csak az esőzés elállása után 21 óra múlva következett be. (F3. ábra)



F3. ábra A lehullott csapadékmennyiség és az elfolyó vízmennyiség értékei meredek zöldtető esetén, egy 18 órás esőzés idején [27]

Ugyanebben az időszakban a csapadékvíz megtartása mindössze 28,5% volt. Figyelemre méltó, hogy az ültetőközegnek közel fele homokos talajból, a másik fele pedig 8...16mm-es szemcse nagyságú duzzadó agyagból állt, és a vegetáció még alig fejlődött ki az

ültetőközegen. A tető vízmegtartó képessége a mérések szerint kisebb volt, mint a gyakorlatban megszokotté, és a mai előírásokban megköveteltté. Ebbe az esetben, a számításokban feltételezett „15 perces eső” az elszivárgás szempontjából egyáltalán nem volt jelentős, releváns.

A bajorországi veitshöchheimi Kertészeti és Szőlészeti Intézet számítása szerint 10 cm vastag ültetőközegből álló zöldtetőn 15 perces 20L/m<sup>2</sup> intenzitású eső esetén alig 5L/m<sup>2</sup> csapadékvíz folyik el, míg a kavicsos bitumenes lemezzel fedett lapostetőn 16L/m<sup>2</sup>.

Az **F3. ábra** grafikonja ezt egy 12°C-os 14 cm vastag talajrétegű tetőn természetes csapadékvíz esetére mutatja be.

A hazai mérési vizsgálatok ennél hosszabb időre terjednek ki és az előbbiekhöz közel azonos eredményeket mutatnak. A több hónapos vizsgálatok szerint a budapesti mérési helyeken vizsgálva az állapítható meg, hogy a szakszerűen kivitelezett flóratetők a 6...8 mm alatti csapadékot teljes egészében visszatartják és a növényzettel a mikrokörnyezetben elpárologtatják.

Az ennél nagyobb intenzitású csapadéknak kb. 30...50%-át tartják vissza. Az elfolyó csapadékvíz az **F3. ábrához** hasonlóan kb. félnapos fáziseltolással követi a csupasz vízszigetelés görbét. Ezek a kísérletek azt mutatják, hogy az ültetőközeg jó puffereelő (kiegyenlítő) és a vízfolyást lassító képessége jelentős mértékben enyhíti a városi csatornahálózatra háruló terheket, különösen azokban az esetekben, amikor maximális mennyiségű csapadékkal kell számolnunk. Ezáltal azokon a településeken, iparterületeken, ahol számottevő mennyiségű flóratetőt építenek, csökkenthetők a csatornarendszer méretei. Egymástól függetlenül működő szennyvíz-és csapadékvíz-elvezető rendszer akár teljesen el is maradhat, ha a földterület magába tudja szívni a csapadékvíz fennmaradó mennyiségét.

## 2.2. Mérési tényezők ingadozása

A mérési tényezők sok ingadozásnak vannak kitéve, amelyek a következőkben lesznek kiértékelve. A 2.1. fejezetben kísérleti eredmények láthatók, amiket a különböző kutatók az alábbiakban felsorolt előfeltételek kombinációs lehetőségeinek figyelembevételével készítették el.

Az ingadozások a különböző tetőkonstrukció és az ideiglenes befolyásokon alapszanak.

Tetőkonstrukció:

rétegvastagság

telepítés (intenzív/extenzív)

építéstechnológia (egy-, két-, vagy háromrétegű tető)

tetőlejtés

különböző anyagcsoportok víztározó-képessége: vízkapacitás a szemcseméret-eloszlás és az szervesanyag-eloszlás függvényében.

időjárási tényezők: nap- és szél expozíció

Ideiglenes befolyások:

évszak: vegetációs és időjárási periódusok befolyásolják az evapotranspirációt

levegő- és vízháztartás: össz-, durva-, közép- és finompórus összetételének változása

átgyökerezettség

előtelítettség: rövid egymás utáni csapadék intervallumok, szárazsági periódusok

esőidőtartam és intenzitás

vegetáció fejlettségi állapota: átgyökerezettségi fok és lefedési fok, természetes állomány képződése

## 2.3. Mérési tényező, kísérleti eredmények és normatív előírások

Megjegyzés:



A következő fejezet (2.1.1.) a szerzők által variált peremfeltételeket tartalmazó táblázatos felsorolással foglalkozik (**F3., F4. táblázat**). Az (2.1.2.) és (2.1.3.) fejezet a keretfeltételek és a kísérleti eredmények összefüggéseire mutat rá, valamint ezek a normatív előírások eredményeitől való eltérésre.

### 2.3.1. Peremfeltételek ingadozásai

A szerzők kísérleteik során különböző befolyási tényezőket variáltak, amelyek a zöldtetők lefolyási mechanizmusait és vízmegtartó képességeiket mértékadóan meghatározzák. Valamint a kísérletek kiértékeléseinél nagyon eltérő súlypontokat helyeztek a különböző befolyásokra.

Valamennyi kísérletüknél (eltekintve Hegemann és Müller kísérleteitől [39] kis próbafelületeket vizsgáltak  $1 \text{ m}^2$  -  $33 \text{ m}^2$  -ig.

Továbbá a próbafelületek többsége földközelen lett felépítve, és mivel a talajtól távolodva a szélereősség emelkedik ezt a tényezőt az eredményekre át kellett vetíteni. Ugyanis ha csökkentett szélereősséggel számolunk, akkor a valóságtól eltérően kisebb evapotranszspiráció (Függelék I, 1.13.) hat, ebből pedig gyorsabb telítettség eredményeződik, amiből pedig nagyobb lefolyási tényező (Függelék I, 1.1.) adódik.

Táblázatos felsorolása a variációknak, amiket a szerzők a kísérletek során használtak (**F3., F4. táblázat**):

Az **esőidőtartamot** megváltoztató Mendel, Kolb, Amrein és Kaumann. [32], [45], [2], [25].

Az **esőintezítés** variációit felállító Kolb, Liesecke, Lösken. Amrein és Kaufmann. [29], [53], [2], [25].

Kolb a **telítettséget** variálta. [45].

A rétegek **erősségének** variációját Liesecke, Lösken valamint Diestel és Schmidt foganatosította. [29], [51], [35].

A különböző **építésmódokat** Liesecke és Lösken vizsgálta. [29], [53].

Az **egyrétegű építésmódot** Liesecke, Lösken, Diestel és Schmidt vizsgálta. [29], [35].

A különböző **évszakokat/időszakokat** Liesecke és Schmidt vette figyelembe. A vegetációs periódus és az időjárás periódusokat az évszakoktól függően.

Az építési rétegek **anyagcsoportjait** Mendel, Kolb, Liesecke, Lösken és Amrein vizsgálta. [32], [45], [29], [51], [2].

A különböző **tetőhajlásszögeket**, valamint a **tájélopsi** lehetőségekt Schmidt vizsgálta.

A különböző **zöldesítési fajtákat** és annak befolyólopsását Kolb és Liesecke tanulmányozta.

Liesecke vizsgálta továbbá azon felépítmények viszonyait, ahol a vegetációs hordozóréteg és a vegetáció együtt lett kialakítva. [29].

### 2.3.2. Kísérleti eredmények ingadozásai

Az ingadozások egyrészt abból adóznak, hogy a szerzők a súlyponti kérdést a vizsgálat elvárt eredményétől függően máshová helyezték, illetve a kísérleti berendezések sem voltak azonosak.

Másrészt figyelembe kell venni, hogy ez a különböző keretfeltételeknél, amelyek a zöldtetők vízlefoyasát befolyólopsolják igen problémás és érzékeny, illetve valamennyi lefoyasási- és maximális lefoyasási tényezőt általánosítani célszerűtlen lenne.

A peremfeltételek ingadozásai hatnak a kísérleti eredmények ingadozásaira.

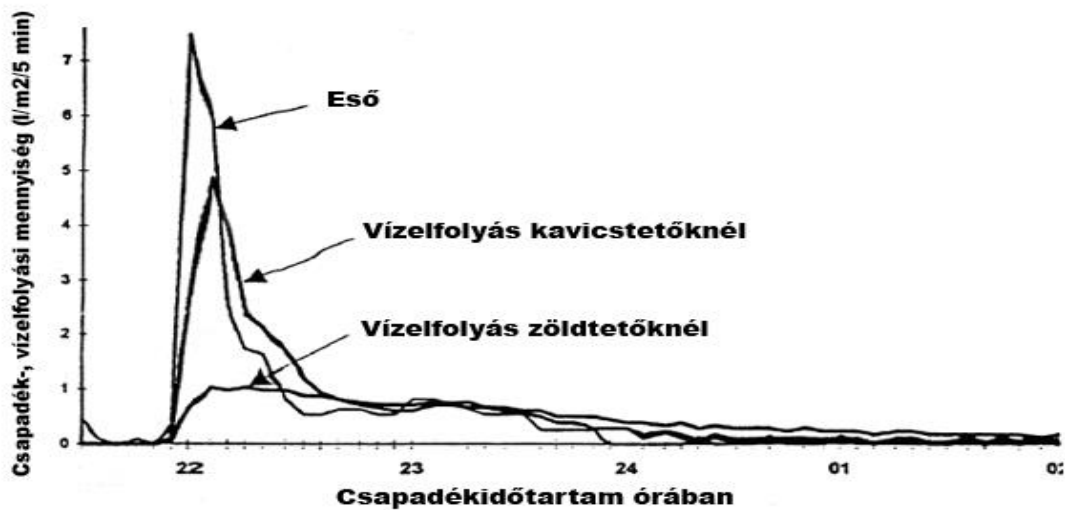
Az ebben a fejezetben összefoglalt eredmények megállapítják, hogy a maximális lefoyasási tényező és az éves lefoyasási tényező 10% és 90% közötti intervallumban mozog.

A maximális lefoyasási tényező (Függelék I, 1.2)  $\psi_s$  0,10 és 0,90 között konkrét értékeket vesz

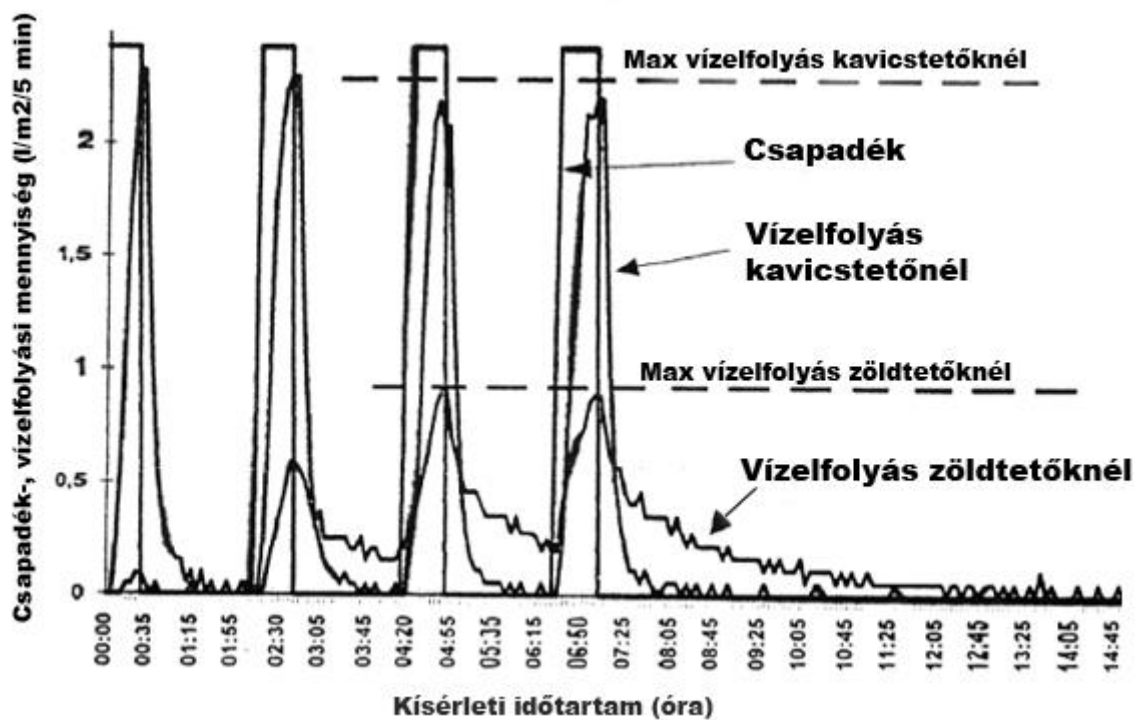
fel, míg a normatív előírások [54] értékei 0,3 és 0,5 között mozognak, illetve a kötelező érvényű „Zöldtetők irányelvei” [16] ezen értékeket 0,1 és 0,7 között adják meg.

### 2.3.3. Kísérleti eredmények

A következő görbe a lefolyási jellemzőket szemlélteti zöld- és kavics-, illetve kátránypapíros tetőknél.



F4. ábra: Kavics- és zöldtető eső- és lefolyási görbéje [25]

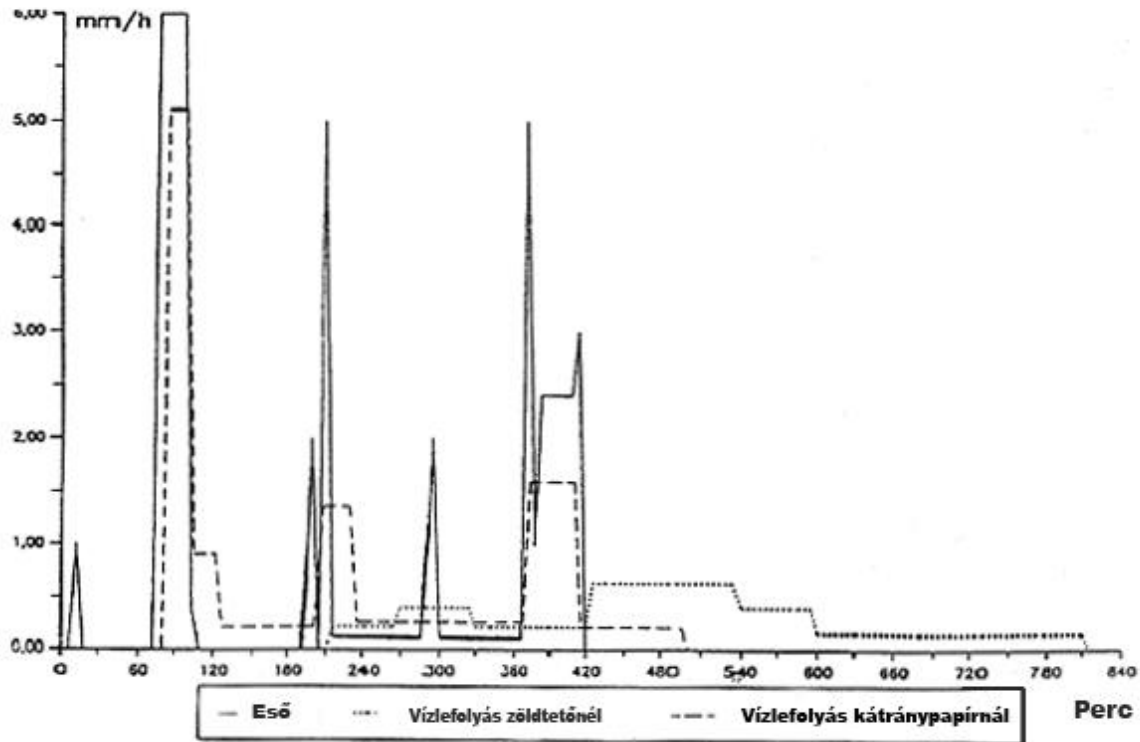


F5. ábra: Kavics- és zöldtető eső- és lefolyási görbéje [25]

**F3. táblázat:**

Szerző	$\psi$	$\psi_s$	$\psi_a, \psi_m$	Késleltetés	Összvastagság	Építésmód	Terület/Hajl	Megjegyzés
Mendel 1985		0,57-0,70 0,40		—	7-9 cm	kétrétegű	16m <sup>2</sup> /25°	$r_{30}=70$ l/(sxha)
Kolb 1987		0,23	$\psi_m = 0,47-0,95$	5 min	12 cm	háromrétegű	1m <sup>2</sup> /0°	Intenzív csapadék $r_{15}=222l/(sxha)$ nincs T <sup>1)</sup>
		0,20- 0,48	$\psi_m = 0,29-0,6$	Telítettség miatt nincs	12 cm	háromrétegű	1m <sup>2</sup> /0°	Gyenge eső T <sup>1)</sup> =12-51 térf %
Liesecke 1988- 1994 [1998]	0,4- 0,5		$\psi_{ao} = 0,40-0,50$ $\psi_{a,ny^2} = 0,20-0,35$ $\psi_{a,ny^3} = 0,15$	kb. < 20 min	6-15 cm	Különböző építésmód	4-10m <sup>2</sup> /	$r_{15}=300l/(sxha)$
és Lösken [1991]	0,6- 0,7		$\psi_{ao} = 0,50-0,60$ $\psi_{a,ny^2} = 0,35-0,45$ $\psi_{a,ny^3} = 0,50$	kb. < 10 min	2-6 cm		1,14-0,72°	Természetes csapadék
Schmidt 1992 és Koehler			$\psi_{ao} = 0,21-0,26$		11- 12 cm	háromrétegű	1,1m <sup>2</sup> /0°	Természetes csapadék
			$\psi_{ao} = 0,21-0,30$				1,1m <sup>2</sup> /12°	
			$\psi_{ao} = 0,21-$				1,1m <sup>2</sup> /12°	
Hegemann és Müller 1994		0,10 0,80 0,41	$\psi_a = 0,55$ $\psi_{a,ny^2} = 0,49$ $\psi_{a,t^4} = 0,67$	60- 90 min	10 cm	háromrétegű	-m <sup>2</sup> /25°	Természetes csapadék $r \ll r_{15}$
Huhti és Swiridjuk 1994		0,4- 1,0 0,27-0,98		—	7 cm	háromrétegű	-m <sup>2</sup> /25°	$\psi_s = f$
		0,2-0,64	$\psi_a = 0,46$	< 1 min			Szimuláció	$\psi_s = f(T)$ T <sup>1)</sup> =20
Diestel és Schmidt 1997		0,57	$\psi_m = 0,44$	~ 15 min	5 cm	egyrétegű		Intenzív csapadék $r_{20}=210l/(sxha)$
		0,20	$\psi_m = 0,24$	~30 min	12 cm			
Amrein 1997			$\psi_a = 0,34-0,42$	—	7,5- 14 cm	háromrétegű		Természetes csap. $r \ll r_{15}$
				Ø≈210 min, T <sup>1)</sup> min.				R <sub>480</sub> =85l/(sxha)
				Ø≈90 min, T <sup>1)</sup> nagy				R <sub>60</sub> =56l/(sxha)

Kaufman1 998		0,13	$\psi_{ao}=0,66$ $\psi_m=0,72$	5 min	10 cm	kétrétegű	$25 \text{ m}^2/^\circ$	Intenzív csap. $r_{15}=250 \text{ l}/(\text{s x ha})$
-----------------	--	------	-----------------------------------	-------	-------	-----------	-------------------------	--



F6. ábra: Kátránypapíros és zöldtető eső- és lefolyási görbéje [39]

F4. táblázat: Extenzív tetők

Szerző	$\psi$	$\psi_s$	$\psi_a, \psi_m$	Késleltetés	Összvastags	Építésm	Terület/Hajl	Megjegyzés
Liesec ke 1998 és Kolb 1995	0,1		$\psi_{ao} \leq 0,10$	n..a.	> 50 cm		n.a/kb 2-3%	$r_{15}=333 \text{ l}/(\text{s x ha})$
	0,2		$\psi_{ao}=0,10-$		25-50 cm			$r \ll r_{15}$
	0,3		$\psi_{ao}=0,30-$	15 -20 min	15-25 óm			
Kolb 1997		0,22		15 min	~20 cm	kétréteg ű	$0,54 \text{ m}^2/^\circ$	$r_{15}=333 \text{ l}/(\text{s x ha})$
		0,07		45 min	~40 cm			

#### Magyarázat:

A kövérrel nyomtatott lefolyási együtthatók értékeit a szerzők adták meg, a normállal nyomtatott értékeket diagrafból nyertük.

<sup>1)</sup> T=Telítettség (térf.-%)

<sup>2)</sup> Az index ny a nyári időszakra vonatkozik (Április-Szeptember)

<sup>3)</sup> Az index h a hideg időszakra vonatkozik (Március közepe-November közepe)

- 4) Az index t a téli időszakra vonatkozik (November közepe - Március közepe)
- 5) Az index ny a nyári hónapokra vonatkozik (Június - Augusztus)
- 6) Az index t a nyári hónapokra vonatkozik (Június - Augusztus)

## Függelék 3. Extenzív zöldtetők lefolyás-késleltetése

### 3.1. Kutatások ismertetése

A Neubrandenburgi Alkalmazott Tudományok Egyeteme 1999 óta folytat gazdasági kutatásokat az extenzív zöldtetők témakörében. A különböző növénytársulások és növényfajták összeállításáról szóló kutatások mellett nagy szerepet kap a zöldtetők vízháztartásának vizsgálata is. A jelenleg is folyó mérések adatokkal szolgálnak mind az elfolyó, mind pedig a tetőfelépítmény által visszatartott vízmennyiségre vonatkozóan. Ebből kifolyólag most már nem csak az éves csapadékelőfolyás arányát (Függelék I, 1.4.) tudjuk megállapítani, ami több kutatási területről ismert adatok szerint 0,2 és 0,5 között változik, hanem lehetséges a zöldtetők valódi napi vízszükségleteinek a megállapítása a minden évszakra kiterjedő kutatások segítségével. Ezek a paraméterek mindezülig ismeretlenek, csakúgy, mint a zöldtető határfoka téli körülmények között.

A neubrandenburgi kutató központ által közreadott adatok az evaporációra (Függelék I, 1.11.) illetve transzspirációra (Függelék I, 1.12.) vonatkozóan a következő kérdésekre hivatottak választ adni:

A vegetációs évszakok közötti csapadék-lefolyási arányok

Ha a zöldtető rendszer telített és még több csapadék hullik

Ha a zöldtető rendszer száraz és intenzív eső érkezik

A különböző vegetációk tároló kapacitása egy tipikus kavicsolt lapostető felépítményen mért adatokkal lett összehasonlítva. A megvizsgált tetőkön végzett minden mérés valódi klimatikus körülmények között készült.

Az eddig észlelt mértékadó eredmények a következők:

Téli időszakban a zöldtetők vízvisszatartása (Függelék I, 1.9.), retenziója kedvezőbb értékeket mutat, mint a kavicsbetéteké. Fajlagosan körülbelül 10%-kal magasabb a zöldtetők evapotranszpirációja (Függelék I, 1.13.) a kavicsbetétekénél.

A kavicsborítás mindössze 1-2 mm csapadékot képes tárolni, legyen az alacsony vagy magas intenzitású esőzés. Ez a kis vízmennyiség is távozik már két nap után.

Vegetációs időszakokban: a zöldtető szignifikánsan több vizet képes tárolni és ezt több mint két hétig tudja a növények számára biztosítani.

Az extenzív zöldtető növényfajainak vízszükséglete akár 2 mm-rel is változhat napról napra.

Belvárosi területeken, mint például Berlinben a terület  $\frac{1}{4}$ -e lehetne zöldtetővel beépítve. Ennek a környezetre gyakorolt hatása nem elhanyagolható, ugyanis a kavicsolt tetőkhöz képest a legszerényebb becslések szerint is évenként 535 m<sup>3</sup> csatornavíz takarítható meg zöldtetők építésével.

Az egyik legfontosabb tényező, ami megkülönbözteti az extenzív zöldtetőket a tetőkertektől vagy az intenzív zöldtetőktől az, hogy nem igényelnek a telepítés után további öntözést. Azon növényfajok, amelyek ezt átvészelik, képesek lesznek alkalmazkodni az elérhető vízkészletekhez és az adott tető körülményeihez.

Az extenzív zöldtetők könnyűszerkezetes konstrukciók, ezért szinte bármely típusú házra ráépíthetők és széles körben alkalmazhatók városi környezetben. Az extenzív zöldtetők számának növelése jelentős befolyással bírhat a városi térségek csapadékvíz kezelésére, ami csupán az egyik előnye a zöldtetők létesítésének.

A zöldtetők optimalizálhatók a csapadékvíz kezelés szempontjából, amihez a szükséges, hogy minél több lapostetőn megjelenjen egy vékony vegetációs réteg a lehető legjobb vízmegtartási tulajdonságokkal. A zöldtető felépítmények legalább négy olyan elemet tartalmaznak, amelyek hozzájárulnak a csapadékvíz kezelés javításához. Ezek a következők:

szivárgóréteg, ültetőközeg a vegetáció túlfolyó rendszer.

Az [16] szerint a szivárgóréteggel kombinált ültetőközeg legkisebb vízmegtartása 35 mm kell, hogy legyen. Az időleges túlfolyó kapacitás számítható további 5 mm-nyi víz hozzáadásával. Ebből kifolyólag lehetséges egy adott csapadékperiódusból származó vízmennyiség tárolása egy bizonyos ideig. A vízmegtartási tulajdonság javításához a porózus összetevők helyes megválasztása szükséges.

Egy tipikus bitumenes lapostető csupán a „túlfolyó” tulajdonsággal rendelkezik, ami azt jelenti, hogy nem az összes esővíz távozik azonnal, ugyanis kisebb tócsák, pocsolyák formájában egy rövid ideig hátramarad. Ennek kis része természetes hűtésként is működik, de ez éves átlagban a csapadéknak mindössze 10%-a.

A kavicsolt tetőkön legtöbbször egy 5 cm-es kavicsréteget terítenek el, aminek a vízmegtartási értéke (Függelék I, 1.9.) közel nulla. Azonban vannak olyan hézagok a kavicsok között, ahol egy csekély mennyiségű víz mégis megmarad. Németországban a kavicsolt tetők igen népszerűek, fajlagos súlyuk körülbelül az extenzív zöldtetőkével azonos, éppen ezért egymásnak konkurenciái tudnak lenni.

Egy csapadékperiódus alatt a víz a táptalajon keresztül a szivárgóréteggig hatol, ahonnan egy kis hányada elfolyik. Mialatt a vegetáció transzspiráció (Függelék I, 1.12.) útján, addig az ültetőközeg evaporációval párologtatja a vizet. A csapadék egy része a leveleken és a talajszemcsék között hátramarad, ezt kötött víznek nevezzük.

Ezek a komponensek együtt dolgoznak, de külön kell számítani az értékeiket, annak érdekében, hogy megbecsülhető legyen az éves mennyiségük, illetve arányuk különböző éghajlati időszakokban. A lehullott csapadéknak csak egy része távozik azonnal, a maradék azonban az egyensúly beállása után, evapotranszspiráció (Függelék I, 1.13.) útján, a következő napok során párolog el. A kihívás az egy nap alatt elpárolgó mennyiség kiszámítása. Az árnyékolás és a párologással történő hűtés a kulcs tulajdonságai a zöldtető rendszernek, amelyeknek kiszámítható a városokban jelentkező hősziget effektust csökkentő hatásuk mértéke.

Németországban a legelterjedtebb záróréteg a lapostetőkön a kavics. A továbbiakban ötfajta extenzív zöldtető felépítményt hasonlítunk össze egy tipikus kavicsolt tetővel. Ez a munka kizárólag a csapadékvíz hasznosításra fókuszál. Semmi kétség, afelől, hogy a zöldtetők még sok előnnyel szolgálnak, de a Neubrandenburg Centre-t néhány éve már a csapadékvíz hasznosítás érdekelte, és ennek köszönhetően választ találtak néhány kérdésre.

### 3.2. Módszerek

A valós lefolyási arányok merőben eltérhetnek a rendkívüli körülmények között mért értékektől. Mi a helyzet például akkor, amikor nagy intenzitású csapadék hullik, de a rendszer már vízzel telített? Vagy mi történik akkor, ha a rendszer légszáraz és nagy intenzitású eső esik?

A lysimeter, ombrometer (Függelék I, 1.16.) és billenő műszer elhelyezése a neubrandenburgi kísérleti tetőn segít megtalálni a választ ezekre a kérdésekre [27].

A vizsgálatra összegyűjtött adatok a 2004 áprilisa és 2005 májusa közti egy év napi szintű méréseiből származnak. A csapadékmennyiség Lambrecht-ombrometerrel és egyéb gyűjtőedényekkel lett mérve. Az elfolyó vízmennyiséget 1 l-től 5 ml-ig terjedő kapacitású billenő műszerekkel határozták meg, míg a vízmegtartást lysimeterrel.

### 3.3. Eredmények

Az adatgyűjtés 1999 januárjában kezdődött és az extenzív zöldtető rendszerek éves lefolyási arányának (Függelék I, 4.1.) tényleges mérőszáma 0,4-re adódott, ami az [16] szerint megfelelő érték. Ugyanezen időszak alatt a kavicsolt tető esetén ez az érték 0,8. 2000 júliusában kiváló lefolyási értékeket mértek, zöldtetőn körülbelül 0,05, míg kavicsolt tető esetén 0,35 volt.

Ezután az utolsó évre fókuszáltak, és kiválasztották azt a hat hónapos periódust (okt. 1- márc. 31.), amikor nincs növénynövekedés. Ezalatt 278 mm volt a csapadékmennyiség, és a mérések azt mutatják, hogy mind a kísérleti, mind a valódi zöldtető rendszerek lefolyási tényezője 0,62-re adódott. A kavicsos szerkezetek ugyanezen értéke 0,8 volt, és nincs különbség téli és nyári időszak között. Tehát a kavicsos és zöldtető rendszerek közötti különbség csaknem 0,2 volt, ami az evapotranszpirációnak (Függelék I, 1.13.) volt köszönhető, ami télen is jelentkezik. A 181 napos mérési időszak alatt 21 mm-es különbség volt a kavicsos és zöldtetők evaporációs (Függelék I, 1.11.) értékei között. A kavicsolt tető átlagos napi párolgása 0,35 mm, a zöldtetőé ezzel szemben 0,5 mm.

### **3.3.1. Nagy intenzitású eső nedves megelőző körülmények között nyáron**

Vajon mekkora a tárolókapacitás, ha a rendszer már telített? A 2004 nyara óta eltelt időszak választ adhat a kérdésre. Egy néhány napos esős periódus alatt 18,3 mm csapadék hullott. A kavicsolt tetőről mintegy 12,4 mm víz távozott azonnal, ezzel produkálva egy 0,7-es lefolyási tényezőt (Függelék I, 1.1.). Ezzel szemben a zöldtetőről csupán 9 mm-nyi folyt el, ami 0,5-ös értéket jelent. Ez a különbség a tározó kapacitásában is megmutatkozott. Bár a zöldtető rendszer már majdnem tele volt, az ültetőközegben lévő nagyobb pórusok mintegy 5 mm többletvizet tároltak. Az ezt követő tíz napban nem történt újabb csapadékhullás, mialatt 10,9 mm víz párolgott el a zöldtetőről. Ezzel szemben csupán 1 mm-nyi volt a kavicsolt tető párolgási értéke.

### **3.3.2. Nagy intenzitású eső száraz körülmények között, 2005 tavasz**

2005 tavaszát egy hosszú, 16 napos száraz, csapadékmentes időszak jellemezte. Az első két napban a kavicsos felületekről 0,5 mm víz párolgott el, ezután ezek teljesen kiszáradtak. A talajrétegből viszont az első két napon 0,5-0,1 mm párolgott, a teljes periódus alatt összesen 7,1 mm.

Erre a szubsztrátra egy 12,5 mm-es eső hullott. A kavicsotető 1,9 mm vizet tartott vissza és mintegy 9 mm folyt el. A zöldtető felépítmény pedig 11 mm-t megtartott és csupán 0,2 mm-t engedett lefolyni. A következő csapadékhullásig 2 mm párolgott el a kavicsfelületről, mialatt 5,8 mm evapotranszspirált el a zöldtető felületről, ami egy 1,4 mm-es napi átlagot jelent.

### **3.3.3. 2004/2005 tele egyetlen nagy intenzitású csapadékhullással**

Közép-Európában a téli évszak alatt a nagy intenzitású esőzések igen ritkák. Vagy fagyos idő van eső és hó nélkül, vagy pedig néhány napos esős időszak jelentkezik. Jelen esetben ez az esős időszak produkált egy 13,5 mm-es egyszeri esőzést, amely rendkívül telített körülményeket teremtett. A nedves zöldtető körülbelül 1 mm vizet tárolt el. A kavicsos felület és a zöldtető lefolyási értékek között különbség adódott, mégpedig a kavicsos tetőről való lefolyás azonnali volt, míg a zöldtetőről lassan és hosszabb időtartam alatt távozott a víz. Téli időszakban az evaporációs érték 0,1 és 1 mm között változik, ami nagyrészt a szélereősségtől függ.

### **3.3.4. A csapadékvíz-kezelés eredményei városokban zöldtetők használata mellett**

Ahogy azt már említettük, az extenzív zöldtetős rendszereknek pozitív hatása van a csapadékvíz-kezelésre mind nyári, mind téli időszakban. A lefolyási arányok vonatkozásában a zöldtetők télen mintegy 10%-kal, nyáron pedig csaknem 90% kedvezőbb értékeket mutatnak, mint a kavicsolt tetők.

A zöldtető szerkezet lecsökkenti az elfolyó vízmennyiséget és eltolja a lefolyási csúcsidőszakot. A legjobb eredmények nyáron észlelhetők. A számítások lehetővé teszik, hogy összehasonlítsuk az eredményeket a Brazíliában lévő trópusi éghajlat viszonyaival. Amiatt, hogy a magas csapadékmennyiséget megközelíti az igen magas evapotranszspirációs



érték, a trópusokon figyelhető meg a zöldtetők legnagyobb hatékonysága. Télen, amikor alacsony a csapadékmennyiség és a napi párolgás, a fent említett hatékonyság csupán mintegy 10%-kal jobb.

A lefolyás késleltetés hatékonyságát meghatározó tényezők a tető hajlásszöge és az az út, amelyet a csapadékvíznek meg kell tennie az ereszig, vagy az összefolyóig. (számításokat lásd az [16])

A következő táblázat segítséget nyújt a zöldtetők vízigényének becsléséhez, évszak és párolgási érték függvényében.

**F5. táblázat: A táptalaj párolgási értékei telítettség és évszak függvényében**

Évszak	Párolgási érték (mm)	Táptalaj állapota
Téli körülmények	0.1 - 0.5	Telített
Tavaszi körülmények	0.6 - 1 .5	
Forró nyári körülmények	2 - 2.5	Telített

### 3.4. Összegző számítás

Vegyük példaként Berlin városának a beépítettségi indexét, amit a város környezeti térképe mutat. Berlin belvárosi területének 80%-a beépített, amibe beletartoznak az utcák és épületek. Ennek fele tetőfelület, amelyeknek körülbelül 50%-a alkalmas extenzív zöldtető telepítésére. Ez azt jelenti, hogy belváros negyede, azaz hektáronként 2500 m<sup>2</sup> tetőfelület borítható be zölddel, ami 0.4-es átlagos lefolyási tényezőt jelenteni.

Az éves csapadékmennyiség Berlinben 536 mm. A kavicsolt tetők vízvisszatartása (éves retenzió 107 mm) és a zöldtetők vízmegtartása (éves retenzió 321 mm) közötti különbség 214 mm éves szinten. Eszerint minden egyes belvárosi hektárra 535 m<sup>3</sup> visszatartott víz jut évente. Minden egyes „zöld” köbméter azt jelenti a berlini lakástulajdonosok számára, hogy mentesülnek az csapadékvíz-díjak alól. Továbbá a megtartott víz közvetlenül lép be a belvárosi környezeti víz-körforgásba.

A retenzió legnagyobb része nyáron jelentkezik, amikor a hűtő hatás szükséges. Koehler kidolgozta a párolgási hűtés számítását [27]. Ha az összes tető 50%-a kavicsos vagy zöldtető lenne, a hűtőhatásbeli különbség a meglévő tetőkhöz képest 159 kWh/m<sup>2</sup> lenne a zöldtető rendszerek evaporációjának (Függelék I, 1.1.) köszönhetően. Ez Berlin belvárosában 397500 kWh hűtőteljesítményt jelent egy hektárnyi területen egy év alatt.

Utolsó megjegyzésként, Németország más régióiban ennél nagyobb a csapadékmennyiség, ami azt jelenti, hogy a 0.4 mint lefolyási tényezőnél csak kedvezőbb hatásfokot érhetünk el. Összefoglalva, ez a rövid általános számítás rávilágít a zöldtetőkben rejlő valós lehetőségekre, amelyek segítségével javítható a belvárosi területek környezeti minősége.

Ahhoz, hogy alátámasszuk ezt a modellt, szükség van további tanulmányokra, amelyek integrálják a tető hajlásszögét és a csapadék intenzitását.