

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Ökoloogia ja maateaduste instituut

Jaanus Hallik

Ekstensiivse murukatuse jahutusvõime Eesti kliimas

Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal

Juhendaja: prof. Ülo Mander

Tartu 2008

Sisukord

Sissejuhatus.....	4
1. Teoreetiline osa.....	6
1.1. Ekstensiivse murukatuse ehitus	6
1.2. Varasemad uuringud	7
1.3. Ülevaade murukatuses toimuvatest protsessidest	12
1.4. Murukatuses toimuvaid protsesse mõjutavad tegurid.....	15
1.4.1. Taimkatte parameetrid	15
1.4.2. Kasvupinnase parameetrid	18
1.4.3. Katuse kalle ja orientatsioon.....	21
1.4.4. Kliimaatilised parameetrid.....	22
1.5. Hoone energiavajadus ja selle varieeruvus Eestis	23
1.6. Hoonesimulatsiooni vahendid.....	25
1.7. Kliimaandmestik hoonesimulatsioonil.....	27
1.8. Katusekonstruktsiooni soojustamisest Eestis ning selle võimalikust mõjust murukatuse jahutusvõimele	28
2. Materjal ja meetodika	30
2.1. Analüüsil kasutatud murukatuse mudel.....	30
2.2. Analüüsil kasutatud kliimaandmestik	32
2.3. Arvutustel kasutatud dünaamilise simulatsiooni tarkvara	34
2.4. Analüüsil kasutatud hoonemudelite kirjeldus	35
2.5. Andmetöötlus	36
3. Tulemused ja arutelu	37
3.1. Katuse soojustamata	37
3.2. Katuse soojustatud vastavalt Eesti ehitusnormides toodud miinimumile.....	44
3.3. Katuse soojustatud vastavalt hoone projektile (vastab Vabariigi Valitsuse määruse <i>Energiatõhususe miinimumnõuded</i> soovituslikule tasemele).....	48

4. Kokkuvõte.....	53
Summary	56
5. Kasutatud kirjandus.....	58
Lisa 1. <i>Eesti energiaarvutuste testaastas</i> sisalduvad meteoparameetrid	62
Lisa 2. Analüüsitud hoone välispiirete soojusjuhtivuse näitajad ning olulisemad sisekasutuse ning tehnosüsteemide parameetrid.	68
Lisa 3. ruumitemperatuuride dünaamika suvekuude lõikes.....	70

Sissejuhatus

Murukatused on tuntud oma esteetiliste ja linnaökoloogiliste funktsioonide poolest. Linnaökoloogilisest seisukohast on murukatuse olulisemad funktsioonid sademevee kinnipidamisvõime, mis vähendab suuremate vihmade ajal üleujutusi ja kanalisatsioonile langevat koormust, ning õhukvaliteedi ja mikrokliima parendamine, mis vähese taimestikuga linnakeskkonnas on kuiv ja tolmune [Koorberg 2001].

Murukatuse alla jääva hoone seisukohast vaadates kaitseb murukatuse materjale otsese päikesekiirguse ja suurte temperatuurikõikumiste eest, mistõttu materjalide eluiga pikeneb kuni kaks korda, samuti isoleerib murukatuse hoonet välise müra eest ning võib pakkuda täiendavat elu- ja puhkeruumi [Peck *et al.* 1999, Koorberg 2001].

Mitmed eksperimendid omistavad murukatusele ka võime katusealuseid ruume jahutada. Kuna valdav osa praktilistest uuringutest on läbi viidud Eestist oluliselt soojema kliimaga piirkondades nagu Kreeka, Jaapan ja Hiina, siis puudub adekvaatne info murukatuse jahutusvõime kohta Eesti kliimatingimustes.

Käesoleva töö eesmärk on teoreetiliselt uurida murukatuse jahutavat toimet Eesti kliimas rakendades selleks murukatuse matemaatilist modelleerimist. Eesti kliimaandmestiku ning murukatuse matemaatilise mudeli alusel analüüsitakse dünaamilise hoonesimulatsiooni abil läbi katuse hoonesse sisenevaid soojavoogusid ning leitakse murukatuse mõju hoone jahutusvajadusele. Töö täpsemaks eesmärgiks on arvutada:

- soojavood läbi bituumenkattega tavakatuse ning murukatuse kasutades dünaamilise hoonesimulatsiooni vahendeid, Eesti kliimaandmestikku ning reaalse hoone mudelit varieerides soojustuse paksust ning murukatuse koostist,
- suveperioodil analüüsitava hoone katusealuste ruumide õhutemperatuuride käigud,
- jahutusvajaduse algust sätestavat piirtemperatuuri 25 °C ületavate kraadtundide hulk ning hinnata nende põhjal murukatuse mõju hoone jahutusvajadusele.

Käesolevas töös käsitletakse murukatusena selle üht erivormi – ekstensiivset murukatust, mida iseloomustab suhteliselt õhuke kerghuumuspõhine kasvupinnase kiht (5 – 15 cm), valdavalt sukulentsetest ja põuda taluvatest liikidest koosnev hooldusvaba taimestik ning madal ruutmeetrimass, mis saavutatakse spetsiaalse koostisega kasvusubstraadi abil. Ekstensiivse murukatuse kasvusubstraat koosneb valdavas osas kergkruusast, millele on lisatud vähesel määral savi ja huumuse segu. Käesolevas töös ei käsitleta ega kirjeldata detailsemalt teisi katusehaljastuse tüüpe nagu mätaskatus, intensiivne katusehaljastus ning katusaed kuna need vajavad eksploatatsioonil korrapärast hooldust ning kuuluvad pigem esteetiliste katuselahenduste valdkonda.

1. Teoreetiline osa

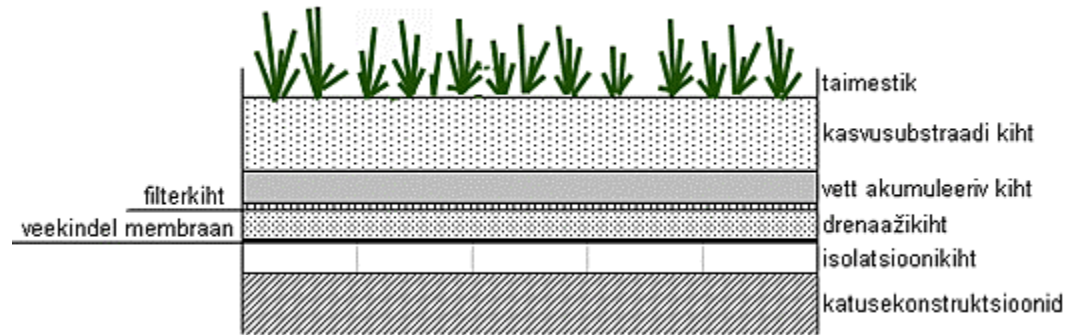
1.1. Ekstensiivse murukatuse ehitus

Ekstensiivset murukatust iseloomustab suhteliselt õhuke kasvupinnase kiht (5-15 cm), milles huumust on vähe ning enamuse moodustab poorne kerge täitematerjal (kergekruus, purustatud tellised vms spetsiaalselt valitud materjal). Kuna pinnasekiht on õhuke, siis sellise murukatuse mass on suhteliselt väike, jäädes umbes 70 ja 170 kg/m² vahele.

Katuse konstruktsiooni poolt vaadatuna koosneb murukatus tavaliselt järgmistest kihtidest [Peck *et al.* 1999]:

- *isolatsioonikiht*, mis kaitseb katusekonstruktsioone ekstreemsete temperatuuride korral kahjustuste eest;
- *veekindel membraan*, tavaliselt geomembraan, mis kaitseb katusekonstruktsiooni niiskuse ja vee eest; valmistatud taimejuurtele vastupidavast materjalist või kaetud eraldiseisva juuretõkkekihiga, mis ei lase taimejuurteil tungida läbi veekindla membraani ja kahjustada selle veepidamisvõimet;
- *drenaažikiht*, mis juhib ära murukatusest läbi imunud liigse vee, et see ei hakkaks taimekasvu pidurdama; tavaliselt kasutatakse selleks kergkruusa või spetsiaalseid geokomposiidist matte;
- *filterkiht*, mis ei lase kasvupinnasest väiksemaid osakesi drenaažikihti tungida ning hoiab nii ära drenaažikihi ummistumise
- *vett akumul eeriv kiht*, mis kuiva kliima ning vähem põuda taluvate taimeliikidele on täiendavaks veevaruks ja ühtlustab kasvupinnase niiskusesisaldust;
- *kasvupinnase kiht*, mille paksus, koostis ja omadused valitakse sõltuvad kasvatatavatest taimeliikidest;
- *taimestik*, mis koosneb nii põuda kui liigniiskust taluvatest taimeliikidest ja varieerub väga palju sõltuvalt murukatuse kasutamise eesmärgist.

Läbilõige murukatuse kihilisest ehitusest on kujutatud joonisel 1.1.



Joonis 1.1. Läbilõige murukatusest.

Väikese mahu tõttu on ekstensiivse murukatuse kasvupinnases niiskussisaldus väga kõikumine ning seetõttu on ekstensiivsel murukatusel võimalised kasvama vaid vähesed taimeliigid. Tüüpilisemalt on nendeks mitmed turdlehelised (perekond kukehari jms) ning alvarikooslusele iseloomulikud taimeliigid nagu harilik nurmelk, nõmm-liivatee jne. Spetsiaalselt valitud liigid on vähenõudlikud ning ei kasva omavahelise konkurentsi tõttu väga pikaks, mistõttu ekstensiivne murukatus ei vaja pidevat hooldust [Koorberg 2001]. Ekstensiivseid murukatusi saab tänu kergemale kaalule olemasolevate hoonete puhul kasutada ning tänapäeval tihtilugu seda ka tehakse kui on plaanis murukatus rajada, sest ehitamiseks ja hooldamiseks tuleb vähem kulutusi teha.

1.2. Varasemad uuringud

Katusealuse hoone seisukohast vaadates kaitseb murukatus katusematerjalide otsese päikesekiirguse ja suurte temperatuurikõikumiste eest, mistõttu materjalide eluiga pikeneb kuni kaks korda, samuti isoleerib murukatus hoonet välise müra eest ning võib pakkuda täiendavat elu- ja puhkeruumi ning mis kõige tähtsam – on kuumal suveperioodil võimeline jahutama katusealuseid ruume hoides nii kokku konditsioneerimiseks vajaminevat energiat [Peck *et al.* 1999, Koorberg 2001].

Murukatuste jahutusvõimet ning seda mõjutavaid tegureid on püütud mitmeti uurida. Eksperimentaalsed uuringud on selles vallas keskendunud valdavalt murukatuse erinevate kihtide ning katuse kohal asuvate õhukihtide temperatuuri mõõtmisele ning nende põhjal katust läbiva soojavoo arvutamisele. Üksikutele juhtudel on otseselt püütud mõõta ka läbi katuse kulgevaid soojavoogusid.

Eksperimentaalsete uuringute kõrval on eelretsenseeritud teadusajakirjades avaldatud ka mitmeid püüdeid murukatuses toimuvaid protsesse matemaatilise

mudelina kirjeldada ning selle põhjal murukatuse võimalikku jahutusvõimet modelleerida ning selle mõjutegureid parameetriselt analüüsida.

2004. aastal viidi Singapuris läbi eksperimentaalne uuring, mille käigus rajati mitmekorruselise parkimismaja katusele ekstensiivne murukatus ning katusepinna ja õhutemperatuuride mõõtmised viidi läbi enne ja pärast katusehaljastuse rajamist, et hinnata murukatuse jahutusvõimet. Ekstensiivse murukatuse korral täheldati katusepinna temperatuuride alanemist erinevate katselappide puhul 10,8 °C kuni 25,2 °C võrra võrreldes tavalise betoonkattega katusega. Arvutuslikult vähenes soojavoog läbi katusekonstruktsiooni ligi 60% [Wong *et al.* 2007].

Jaapanis läbi viidud uuringus leiti, et murukatuse rakendamisel väheneb katusepinna temperatuur võrreldes tavakatusega 30 °C kuni 60 °C võrra [Onmura *et al.* 2001 Wong *et al.* 2003 järgi].

Et määratleda ekstensiivse murukatuse jahutusvõimet rajati 2000. aastal Ottawas (Kanada) NRC (National Research Council of Canada) eestvedamisel murukatuse ning bituumenkattega võrdluskatusega uurimishoone. Tegemist on madala tööstushoone tüüpi hoonega, mille katusepinna ja ülejäänud välispiirete pinna suhe on suhteliselt kõrge (suur katuse osakaal hoone välispiirdes). Nii murukatusel kui võrdluskatusel mõõdeti termoanduritega temperatuurikäike katuse erinevates kihtides. Võrdluskatusel tõusis katusepinna temperatuur suveperioodil korduvalt üle 70 °C, kuid murukatuse puhul tõusis katusepinna temperatuur harva üle 30 °C. Keskmise temperatuuri varieeruvus võrdluskatusel oli kuni 45 °C, murukatuse puhul varieerus katusepinna temperatuur ainult 6°C piires. Lisaks temperatuuridele mõõdeti katusesse integreeritud soojavoo anduritega katust läbivaid soojavoogusid. Läbi võrdluskatuse toimuv soojavoog suurendas katusealuse hoone jahutusvajadust keskmiselt 6,0 kuni 7,5 kWh päevas. Murukatuse puhul oli soojavoost tingitud jahutusvajadus vähem kui 1,5 kWh päevas, mis tähendab enam kui 75 % soojavoo vähenemist läbi katusekonstruktsiooni. Talveperioodil kogutud andmestik näitas, et pärast murukatuse kasvupinnase jäätumist selle isoleerivad omadused vähenesid oluliselt ning pärast püsiva lumekatte teket olid läbi mõlema katuse kulgevad soojavood praktiliselt võrdsed [Liu and Baskaran 2003].

2000. aastal viidi Kreekas läbi kaheosaline eksperiment, mille esimeses osas mõõdeti Loutraki piirkonnas asuva hotelli murukatusel temperatuuride käigud nii välisõhus, siseruumides, kui ka murukatuse ja hoone lagede pindadel. Sarnased

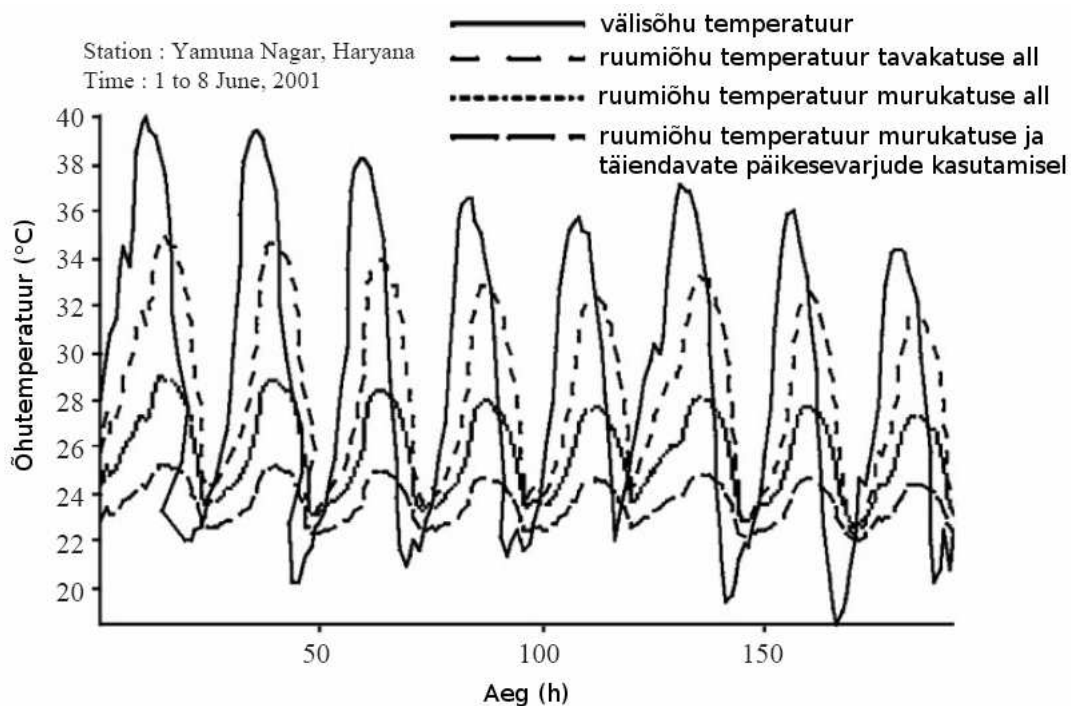
mõõtmised viidi läbi ka kõrvalasuval võrdluskatusel. Lisaks termoanduritele mõõdeti osadel mõõtekordadel katusepinna temperatuure infrapunakaameraga. Mõõtetulemuste põhjal valitses murukatusega hoone puhul keskmiselt 2 °C madalam ruumiõhu temperatuur kui võrdluskatusega hoones. Võrdluskatusega hoone puhul ületasid ruumiõhu temperatuurid 30 °C piiri 69 % mõõteperioodist. Murukatusega hoone puhul ületasid ruumiõhu temperatuurid 30°C piiri vaid 15 % mõõteperioodist [Niachou *et al.* 2001]. Hindamaks murukatusest tingitud temperatuuride vähenemise mõju hoone jahutusvajaduse vähenemisele loodi murukatusega hoone matemaatiline mudel kasutades selleks TRNSYS (Transient System Simulation Program) tarkvara. Hüpoteesilises hoonemudelis varieeriti katusekonstruktsiooni 25 cm paksusest raudbetoonpaneelist kuni 15 cm paksuse isolatsioonikihiga katusekonstruktsioonini. Arvutustulemused näitasid, et kogu hoone jahutusvajadus vähenes soojustamata katuse korral ligikaudu 45 %, 15 cm paksuse soojustuskihiga konstruktsiooni korral oli murukatuse mõju jahutusvajaduse vähenemisele olematu [Niachou *et al.* 2001].

Osaliselt samade uurijate poolt viidi Kreekas läbi uus uurimus, mille käigus täiendati TRNSYS tarkvara abil loodud murukatuse matemaatilist mudelit. Ateena lähedal asuvas murukatusega kahekordses hoones mõõdeti välisõhu ning ruumiõhu temperatuuride käik ning suhtelise õhuniiskuse väärtused nii hoones sees kui väljas. Loodud matemaatilise mudeli abil arvutati hoones tekkivad temperatuurikäigud ning sellele vastav jahutusvajadus. Analüüsist selgus, et soojustamata katusega hoone puhul vähenes jahutusvajadus murukatuse rajamisel sõltuvalt kuust 15 % kuni 49 % ning soojustatud katusega hoone puhul vastavalt 6 % kuni 33 %. Kui analüüsiti eraldi vaid hoone ülemist korrust vähenes jahutusvajadus soojustamata katuse puhul murukatuse rajamisel sõltuvalt kuust 27 % kuni 87 % ning soojustatud katuse puhul vastavalt 12 % kuni 76 %. Suurim jahutusvajaduse vähenemine esines seejuures maikuus [Santamouris *et al.* 2007].

Eelmise uurimuse jätkuna analüüsiti Ateena lähedal sama hoonet veelkord kasutades murukatusega hoone täiendatud matemaatilist mudelit. Analüüsi põhjal vähenes vaadeldud hoones murukatuse rakendamisega jahutusvajadus sõltuvalt kuust 15 % kuni 39 % ning alternatiivselt kuni 58 % kui hoone ülemist korrust eraldi vaadelda [Spala *et al.* 2008].

New Delhi ülikoolis Indias loodi murukatuse jahutusvõime hindamiseks matemaatiline mudel ning mudeli abil simuleeritud tulemuste kontrollimiseks viidi

läbi eksperimentaalsed mõõtmised olemasoleval murukatusel. Murukatuse mudel loodi Matlab tarkvara abil sidudes selle hoone energiatarbimise mudeliga. Loodud ja analüüsitud mudelist arutati murukatuse aluste ruumide õhutemperatuurid ning jahutusvajadus. Analüüsist selgus, et murukatuse rakendamisel väheneb katusealuste ruumide temperatuur keskmiselt 3,3 °C võrra. Sellele vastavalt vähenes ruumide jahutusvajadus keskmiselt 3,02 kWh päevas. Ruumiõhu temperatuuride dünaamika tavakatuse ja murukatuse võrdluses on esitatud joonisel 1.2 [Kumar and Kaushik 2005].



Joonis 1.2. Ruumiõhu temperatuuride ööpäevane dünaamika tavakatuse korral võrreldes murukatuse rakendamisega [Kumar and Kaushik 2005 järgi]

Lisaks eelnevale on läbi viidud veel mitmeid uurimusi eesmärgiga murukatuses toimuvaid protsesse matemaatiliselt kirjelda. Kreeka uurijate pool loodi dünaamiline ühemõõtmelist sooja- ja massiülekanne arvestav mudel kapillaarpoorsetes kehades ning taimestikukihtides [Alexandri and Jones 2007]. Teine Kreeka uurija koostas alternatiivse murukatuse mudeli kontrollides seda eksperimentaalsete mõõtmistega ning viis läbi põhjaliku erinevate murukatuse jahutusvõime mõjutegurite parameetrilise analüüsi [Theodosiou 2003]. Samuti on erinevad uurijad viinud läbi eksperimente nii murukatuse taimestiku [Fang 2008] kui kasvupinnase [Sailor *et. al* 2008] parameetriliseks analüüsiks.

Nagu näha on murukatuse jahutusvõimele keskendunud uuringud valdavalt läbi viidud sooja kliimaga piirkondades nagu Kreeka, Singapur, India ja Jaapan, kus ruumiõhu palavuse probleem on väga aktuaalne ning erinevate jahutusmeetmete rakendamine võimaldab olulist energia kokkuhoidu. Külmema kliimaga piirkondades on murukatuse jahutusvõimet käsitlevaid uuringuid läbi viidud vähem. Samas on praktika näidanud, et suveperioodil on ka Eestis ning Põhjamaades probleeme ilma aktiivseid jahutusseadmeid kasutamata ruumiõhu temperatuuri madalana hoidmisega. Nii näiteks võib kehvasti planeeritud ja projekteeritud kontorihoonete puhul olla jahutusseadmete käitamiseks aasta jooksul kuluv energiahulk suurem ruumiõhu kütmiseks vajaminevast energiahulgast, mistõttu passiivsete jahutusmeetmete rakendamine oleks ka siinses kliimas mõistlik tegevus.

Eestis on murukatuse jahutusvõime osas mõningad uuringud läbi viidud ning hinnatud ekstensiivse katusehaljastuse võimet murukatuse erinevate kihtide temperatuure ühtlustada ning võrreldes tavakatusega oluliselt alandada [Teemusk 2005; Teemusk and Mander 2008]. Uurimustulemused kinnitavad eelpool kirjeldatud tendentse – talveperioodil pärast lumekatte teket ei erine murukatuse temperatuurid oluliselt tavakatuse temperatuuridest, suveperioodil omab murukatuse aga olulist temperatuure alandavat toimet katusepinnale. 10cm paksune kasvupinnase kiht vähendas suviseid temperatuurikõikumisi võrreldes bituumenkatttega katusega 24,2 °C võrra. Üle 30 °C tõusnud temperatuure võrdluskatuse pinnal esines suveperioodil 63 päeval, murukatuse kasvupinnases aga vaid 9 [Teemusk 2005]. Kuna kirjeldatud uurimustöö tegeles peale murukatuse temperatuurikäikude ka sademevee kinnipidamisvõime ning äravoolu veekvaliteedi analüüsiga, siis püüde mõõdetud katuse temperatuuridekäigu põhjal katusealuste ruumide reaalselt jahutusvajaduse vähenemist hinnata on suhteliselt üldsõnalised.

Hoonete reaalse jahutusvajaduse vähenemise hindamine eksperimentaalsete uuringute abil on üsnagi komplitseeritud, kuna hoonete sisekliima sõltub paljudest erinevatest teguritest, mis võivad ajas olla väga muutlikud. Nende tegurite koosmõju erinevate hoonete puhul on erinev ning eksperimentaalsete võrdluskatsete puhul ei ole lihtne üles seada ühesuguste lähtetingimustega katseruume, mistõttu ei ole võimalik hiljem piisavalt üheselt eristada ainult murukatuse rakendamisest tingitud jahutusvajaduse vähenemist. Probleemi lihtsustamise eesmärgil spetsiaalselt rajatud katsestendidel (stabiilse sisekliima tagamisega ruumid, väliskeskkonnast isoleeritud

testruumid jne) katsete sooritamine välistab küll segavad lähtetingimused ning ka nende ajalise varieeruvuse, kuid mõõdetud tulemuste ülekandmine reaalsele hoonetele on seotud mõningase määramatusega.

Selles osas saab murukatuste jahutusvõime uurimisel tõmmata mitmeid paralleele ka teiste hooneparameetrite koosmõju ja hoonete energiavajaduse optimeerimise hindamise ja ennustamisega. Seoses infotehnoloogia arengu ning arvutite arvutusvõimsuse kasvuga on hoonete sisekliima ja energiatarbimise analüüsi võimalik piisavalt täpselt läbi viia hoonete detailse modelleerimise abil. Hoonete modelleerimisel on võimalik detailselt kirjelda ajas muutlikke tegureid nagu hoonete sisekasutuse erinevad aspektid (inimeste ruumis viibimine, erinevate seadmete töögraafikud, valgustuse võimsus ja töögraafik, tehnosüsteemide töö jne) ja väliskeskkonna muutlikkus ning seetõttu saab võrdlusanalüüsiks luua mudelis identsed algtingimused ja varieerida vaid huvipakkuvaid sisendparameetreid eesmärgiga näha nende mõju lõpptulemusele (hoonete energiatarbimine, jahutusvajadus, sisekliima erinevad parameetrid vms). Aastakümneid arendatud meetodikad ning hulgaliselt eksperimentaalseid võrdluskatseid, mis kinnitavad modelleeritud parameetrite vastavust mõõtmistulemustele, on muutnud hoonete modelleerimise ja hoonesimulatsiooni adekvaatseks tööriistaks hoone sisekliimat ja energiakulu mõjutavate tegurite uurimisel.

Murukatuse jahutusvõime hindamiseks reaalse hoone korral on seetõttu vajalik murukatuses toimuvaid protsesse matemaatiliselt kirjeldava mudeli inkorporeerimine olemasolevatesse hoonesimulatsiooni vahenditesse. Järgnevat teoreetilistes peatükkides on kirjeldatakse põgusalt murukatuses toimuvaid protsesse, hoone energiabilansi kujunemist ja selle tüüpilisi väärtusvahemikke ning antakse põhimõtteline lühiülevaade hoonesimulatsiooni vahenditest, mille abil oleks võimalik murukatuse jahutusvõimet hinnata.

1.3. Ülevaade murukatuses toimuvatest protsessidest

Sarnaselt tavakatusele mängib murukatse kiirgusbilansi kujunemisel peamist rolli läbi atmosfääri katuseni ulatuv päikesekiirgus. Lehestik, kui murukatuse pindmine osa, on täielikult avatud päikese otse- ja hajuskiirgusele. 10 - 30 % lehestikuni jõudnud lühilainelisest kiirgusest peegeldub lehtede pinnalt hajuskiirgusena tagasi, ülejäänud läbib osaliselt lehestiku, jõudes lehestiku all oleva maapinnani või neeldudes

taimlehtedes, kus suur osa sellest kasutatakse ära fotosünteesil ja ülejäänud muutub soojusenergiaks. Kuna tume maapind neelab lühi- ja pikalainelist kiirgust väga hästi, on lehestiku varjutaval omadusel murukatuse “töötamise” seisukohast väga oluline funktsioon [Theodosiou 2003, Liu and Baskaran 2003]. Atmosfäärist lehestikuni jõudnud pikalaineline ehk soojuskiirgus neeldub peaaegu täielikult lehtede pinnal, samal ajal kui pikalainelise kiirguse peegeldumine lehtede pinnalt on tühine. See, kui palju pikalainelist kiirgust läbi lehestiku maapinnani jõuab, sõltub vaid lehestikku moodustavate lehtede geomeetrisest paiknemisest ja tuleneb sellest, et lehestik ei ole ühtlane [Palomo Del Barrio 1998]. Pikalainelise kiirguse suhtes “musta kehana” käituvad lehed kiirgavad loomulikult ka ise pikalainelist kiirgust ja seda nii atmosfääri kui maapinna poole. Murukatuse välispinna temperatuur ja seetõttu ka katusest lähtuv pikalaineline kiirgusvoog on lehestiku keerulise struktuuri tõttu ebaühtlane ja väga varieeruv [Niachou *et al.* 2001, Theodosiou 2003]. Pikalainelise kiirguse voogusid lehestiku sees, erinevate lehtede vahel, võib lugeda tühiseks [Palomo Del Barrio 1998].

Päikese otse- ja hajuskiirguse ning atmosfääri soojuskiirguse neeldumise tõttu soojenenud taimlehtedes toimub intensiivne transpiratsioon, vähemal määral ka vee molekulide difusioon lehe pinnale, lehe pinnalt aurumine ning veeauru konvektiivne ülekande lehtedevahelisse õhku. Transpiratsiooni ja aurumise käigus latentse soojusenergia sidumine on oluline soojusbilansi osa ning suveperioodil peamine protsess, mis annab murukatusele võime katusealuseid ruume jahutada [Takakura *et al.* 2000, Theodosiou 2003].

Lehestiku sees olevat õhumassi vaadeldakse ülejäänud atmosfäärist eraldi, kuna see on katuse pindmise lehekatte tõttu osaliselt üksteisest eraldatud. Osalise isoleerituse tõttu tekib lehtedevahelises õhus omaette mikrokliima, milles on aluspinnalt lähtuva intensiivse evaporatsiooni ja taimede transpiratsiooni tõttu rohkem veeauru kui välisõhus. Ka temperatuur on välisõhu temperatuurist erinev, kuna soojusvahetus atmosfääriga on takistatud ning seega käitub lehestikusisene õhk omamoodi soojusisolaatorina välisõhu ja kasvupinnase vahel. Seetõttu on kasvupinnase madala ja välisõhu kõrge temperatuuri korral lehestikusisese õhukihi temperatuur madalam kui välisõhus ja vastupidi [Theodosiou 2003]. Siiski tuleb märkida, et kuigi lehestikus olev õhk on osaliselt välisõhust eraldatud, ei ole konvektiivse temperatuuride ühtlustumise osakaal soojusbilansis tühine ning on seda

suurem, mida väiksem on lehestikuõhu ruumala võrreldes välisõhuga ühise pealispinna pindala korral.

Kasvupinnas saab energeetilise sisendi nii lehestikust läbi tunginud päikese otse- ja hajukiirguselt, atmosfääri soojuskiirguselt, kui ka lehestikust allapoole suunatud soojuskiirguselt. Lisandub veel soojusenergia, mis katusealustest ruumidest soojusülekanne teel läbi katusekonstruktsioonide murukatusesse kandub. Kasvupinnase energeetilise väljundi moodustavad lehestiku poole suunatud soojuskiirgus, vee aurumine pinnaselt ehk evaporatsioon ning soojusülekanne läbi katusekonstruktsiooni katusealustesse ruumidesse.

Kasvupinnas on poorne keskkond, mis koosneb kolmest faasist: tahke (mineraalne ja orgaaniline materjal), vedel (vesi) ja gaasiline (õhk ja veeaur).

Kui pinnas ei ole veega küllastunud, siis toimub soojusülekanne kõigis kolmes faasis. Tahkes ja vedelas kvantitatiivselt rohkem, kuna nende soojusjuhtivus on suurem kui gaasilisel keskkonnal ning vähemal määral seotakse soojusenergiat poorides asuva vee aurustumisel [Palomo Del Barrio 1998]. Veega küllastumata pinnase korral on gaasilise faasi osakaal piisavalt suur (umbes 25% või rohkem sõltuvalt pinnase koostisest), et see takistaks soojusülekannet (võrreldes homogeense tahke või vedela faasiga), mistõttu murukatuse toimib hoone ja atmosfääri vahel isolaatorina. Võrreldes varjutamise, evapotranspiratsiooni ja soojuse akumulatsiooniga on selline isoleeriv omadus siiski teisejärguline [Niachou *et al.* 2001].

Omaette energeetilise sisendina võib vaadelda vihmana katusesse imbunud vett, mille temperatuur on kõrgem kui kasvupinnasel. Analoogselt on vihmaga seotud ka energeetiline väljund. Nimelt kui kasvupinnas piisavalt suure saju korral veega küllastub, siis juhib dreanaažikiht liigse vee murukatusest välja. Kui katusesse imbunud vesi oli madalama temperatuuriga kui kasvupinnas enne vihmasadu, siis suhteliselt suure erisoojuse ($4,2 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$) tõttu võtab katusest väljuv vesi kaasa tema soojendamisele kulunud energia.

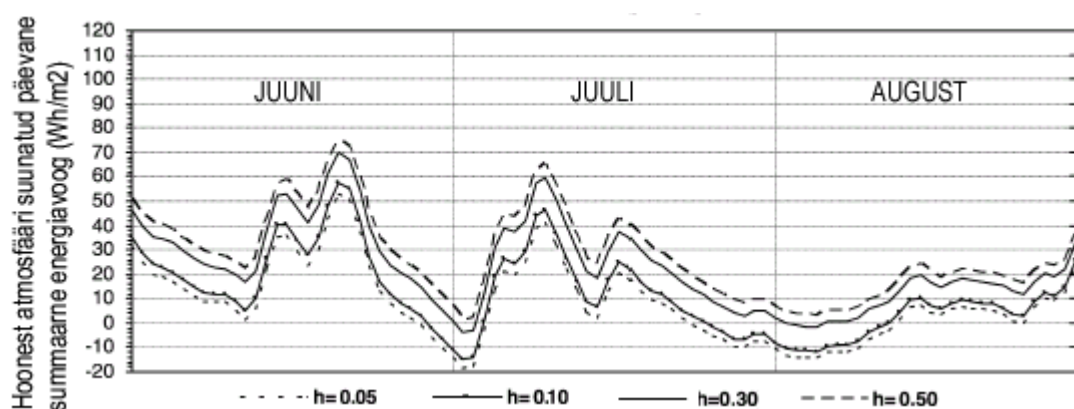
Vee suure erisoojusega on väga lähedalt seotud ka murukatuse võime suuri temperatuurikõikumisi ühtlustada, sest mida rohkem vett kasvupinnases sisaldub, seda suurem on pinnasekihi juba niigi suur soojusmahtuvus. Suure soojusmahtuvusega kehad on aga välistemperatuuri kõikumise suhtes väga inertsed ning energiat akumulatsiooniga soojenevad ja jahenevad ise väga aeglaselt.

1.4. Murukatuses toimuvaid protsesse mõjutavad tegurid

Lähtuvalt eelmises peatükis kirjeldatust on suveperioodil murukatuse “töötamisel” keskseteks protsessideks soojuse akumulatsioon kasvupinnases (kasvupinnase termiline inertsus), murukatuse evapotranspiratsiooniline jahtumine, kasvupinnase soojenemise takistamine varjutamise ja lehestiku sees isoleeriva õhukihi moodustumise teel. Talveperioodil murukatuse praktiliselt ei funktsioneer, kuna kasvupinnas jääb ja suveperioodile omased protsessid toimuda ei saa. Kuni püsiva lumekatte tulekuni tasakaalustab murukatuse tänu termilisele inertsusele vaid temperatuuriekstreemumite mõju. Alljärgnevalt on kirjeldatud mitmeid tehnoloogilisi ja looduslikke parameetreid, mis murukatuse funktsioneerimise seisukohast olulisi protsesse mõjutavad.

1.4.1. Taimkatte parameetrid

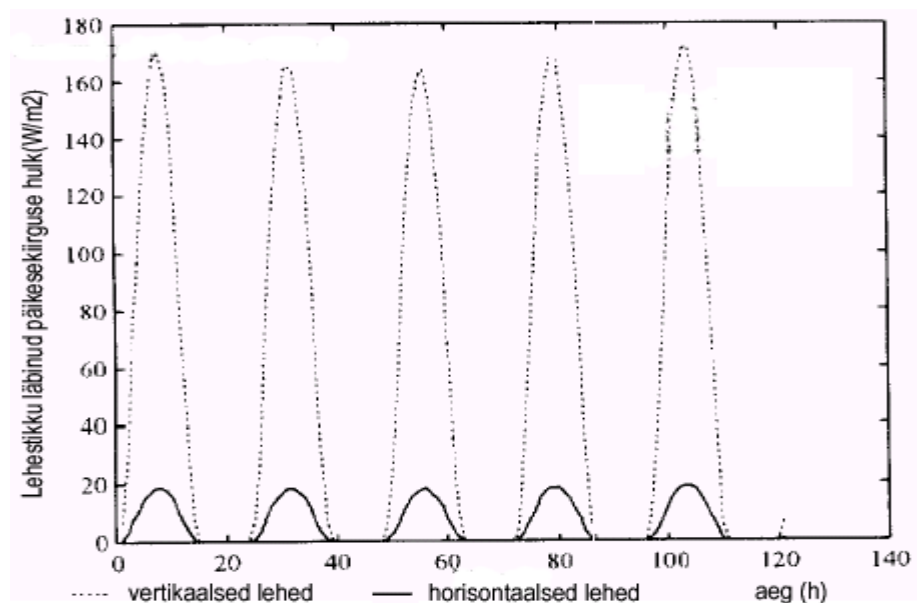
Lehestiku kõrguse mõju on seotud eeskätt lehestikuõhu ruumala vähenemisega taimede kõrguse kahanemisel, mistõttu lehestiku pindala ja ruumala suhe suureneb ning toob endaga kaasa konvektiivse õhuliikumise mõju suurenemise lehestikuõhu temperatuurile. Suveperioodil tähendab see, et kasvupinnas on välisõhust vähem isoleeritud ning soojeneb kiiremini, mistõttu murukatuse jahutusvõime väheneb. Jooniselt 1.3 on näha, et lehestiku kõrguse kahanemise järjekorras ($h = 0,5 ; 0,3 ; 0,1$ ja $0,05$ m) hoonest atmosfääri poole suunatud energiavoog väheneb [Theodosiou 2003].



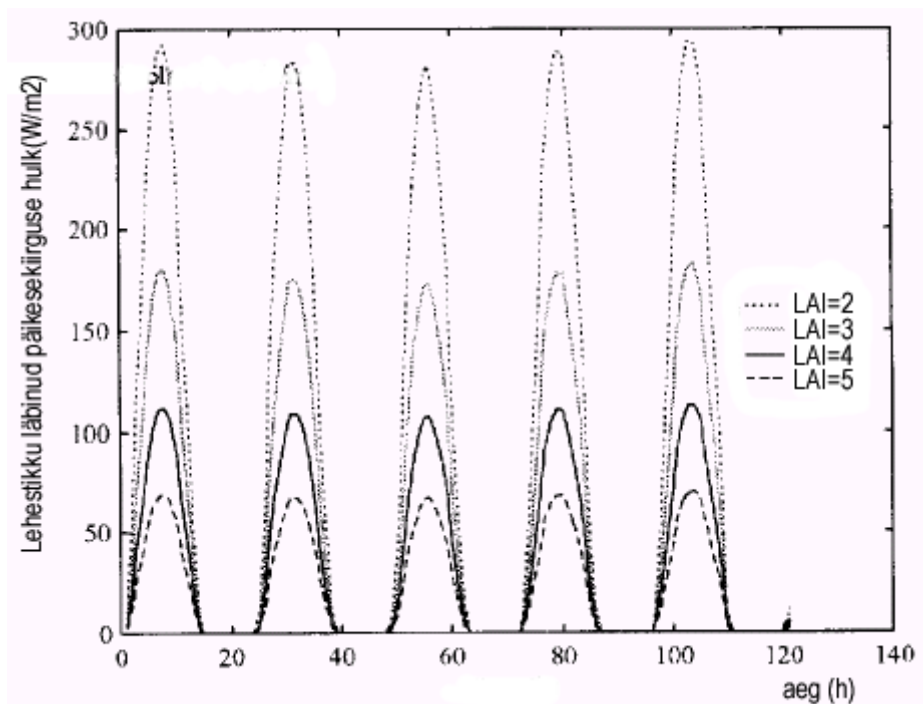
Joonis 1.3. Hoonest atmosfääri suunatud päevane summaarne energiavoog sõltuvalt lehestiku kõrgusest (h) [Theodosiou 2003 järgi].

Lehestiku tihedus ehk lehtede hulk ja suurus on tähtis parameeter, kuna sellest sõltub, kui palju lehestik kasvupinnast päikese otse- ja hajuskiirguse ning atmosfääri soojuskiirguse eest varjab. Kuna lehestik ei ole homogeenne, siis sõltub varjutamine lisaks lehtede hulga ja suurusele ka lehtede paiknemisest lehestikus. Kui lehed asuvad kobaras koos ja paiknevad teineteise all, siis nende võime varjata väheneb. Samuti varjutavad lehed, mis paiknevad vertikaalselt, tunduvalt vähem kui need, mis asuvad horisontaalselt. Jooniselt 1.4 on näha kuidas peamiselt vertikaalsete lehtedega taimede korral pääseb lehestikust läbi palju rohkem päikesekiirgust kui vertikaalsete lehtedega taimede korral [Palomo Del Barrio 1998].

Paljust liikidest koosneva taimkatte korral sellist olukorda tavaliselt ei esine, vaid lehed paiknevad nii vertikaalselt kui horisontaalselt ning varjutavad omadused sõltuvad rohkem lehtede pindalast, taimestiku katvusest ning taimestiku summaarsest lehepinnaindeksist. Lehepinnaindeks (LAI) on lehestiku tihedust iseloomustav suurus, mis näitab lehestiku moodustavate lehtede pindala suhet nende lehtede alla jääva maapinna pindalaühikusse. Jooniselt 1.5 on hästi näha kuidas lehepinnaindeksi kasvades (2 kuni 5) lehestikku läbiva päikesekiirguse hulk ligikaudu 4 korda väheneb [Palomo Del Barrio 1998]. Lehepinnaindeksi väärtused sõltuvad oluliselt murukatusel kasvavate taimede tüübist ja liigist, kuid jäävad valdavalt vahemikku 0,5 kuni 5.



Joonis 1.4. Lehestikku läbinud päikesekiirguse hulk (W/m^2) päevade lõikes vertikaalsete ja horisontaalsete lehtedega taimede korral [Palomo Del Barrio 1998 järgi].



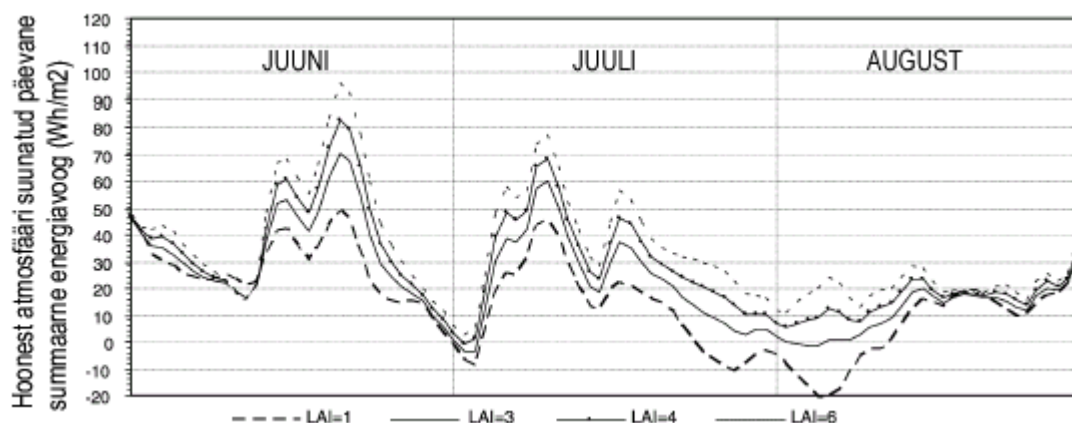
Joonis 1.5. Lehestikku läbinud päikesekiirguse hulk (W/m^2) päevade lõikes erineva lehepinnaindeksi (LAI) korral [Palomo Del Barrio 1998 järgi].

Taimestiku katvusest, mis näitab lehtedega kaetud maapinna osakaalu kogu murukatuse pinnast, sõltub kui suurt osa murukatuse kiirgusbilansis mängivad kasvupinnase kiirguslikud omadused.

Lehtede kogupinnal on ka teine oluline mõju. Nimelt on transpiratsiooni hulk sõltuv lehtede summaarsest pindalast. Mida rohkem lehepinda on, seda rohkem vett saab transpireeruda. Erinevatel uuringutest on selgunud, et juba lehepinnaindeksi 3 juures on evapotranspiratsioon piisavalt suur, et murukatuse soojusbilans muutuks negatiivseks ning katus oleks võimeline hoonet jahutama [Takakura *et al.* 2000, Theodosiou 2003]. Jooniselt 1.6 on näha kuidas lehepinnaindeksi suurenedes hoonest atmosfääri poole suunatud energiavoog suureneb so hoone jahtumine intensiivistub [Theodosiou 2003].

Taimestiku mõju käsitledes tuleb märkida, et transpiratsioon ei sõltu ainult lehtede summaarsest pindalast, vaid on tihedalt seotud ka taimede füsioloogiliste omadustega. Osadel taimedel on näiteks õhulõhesid tunduvalt enam kui teistel või on nende juuresüsteem paremini arenenud ning nad on võimelised kasvupinnasest

ühikulise aja jooksul rohkem vett kätte saama. Transpiratsiooni määra erinevust erinevate taimede puhul väljendab õhulõhede juhtivus.

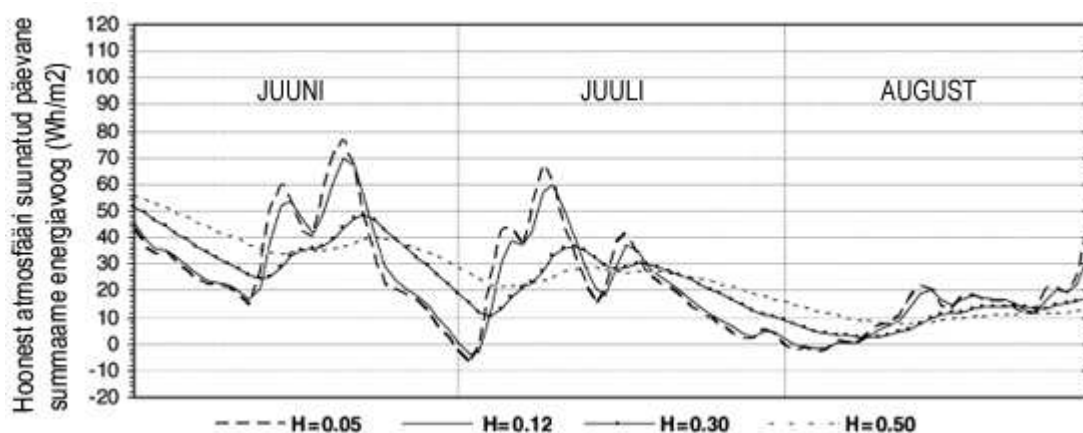


Joonis 1.6. Hoonest atmosfääri suunatud päevane summaarne energiavoog sõltuvalt taimede lehepinnaindeksist(LAI) [Theodosiou 2003 järgi].

1.4.2. Kasvupinnase parameetrid

Kasvupinnase olulisimad parameetrid on selle soojusjuhtivus, soojusmahtuvus ning tihedus. Kuigi kasvupinnase erisoojus on üldjuhul poole madalam kui puhtal veel, on see siiski piisav andmaks pinnasekihile suhteliselt suure soojusmahtuvuse. Lihtne arvutus näitab, et keskmise niiskusesisaldusega (erisoojus 2,31 kJ/kg*K) ning vaid 15 cm paksuse pinnasekihi korral (tihedus 1100 kg/m³) on ühel ruutmeetril asetseva pinnasekihi soojusmahtuvus $0,15 * 1100 * 2,31 = 381,15$ kJ/K. Pinnasekihi paksuse kasvades kasvab ka selle võime soojust akumuleerida ja seega suureneb ka inertsus. Suure inertsuse tõttu soojeneb ja jahtub pinnasekiht aeglaselt, vähendades temperatuuri ekstreemumite mõju katust läbivale energiavoole. Aeglase soojenemise tõttu suudab paksu pinnasekihiga murukatust ka pikema kuumaperioodi ajal hoonet jahutada, samas kui õhem pinnasekiht võib sedavõrd kuumeneda, et atmosfääri suunatud energiavoog muutub negatiivseks ning katusel lasuv pinnas hakkab ise hoonet soojendama. Samas jahtub paksem pinnasekiht aeglasemalt ning kuumaperioodile järgneval jahedamal perioodil jääb ta õhema pinnasekihiga analoogidele jahutusvõimelt alla, kuna viimased saavutavad madala temperatuuri kiiremini. Paksema pinnasekihi eelis on siiski see, et ta pakub jahutust kuumaperioodi ajal – siis kui seda kõige rohkem vaja on. Jooniselt 1.7 võib näha kuidas kasvupinnase

paksuse kasvades, katusest atmosfääri suunatud energivoog ühtlasemaks muutub [Theodosiou 2003].



Joonis 1.7. Hoonest atmosfääri suunatud päevane summaarne energivoog sõltuvalt kasvupinnase paksusest $H(m)$ [Theodosiou 2003 järgi].

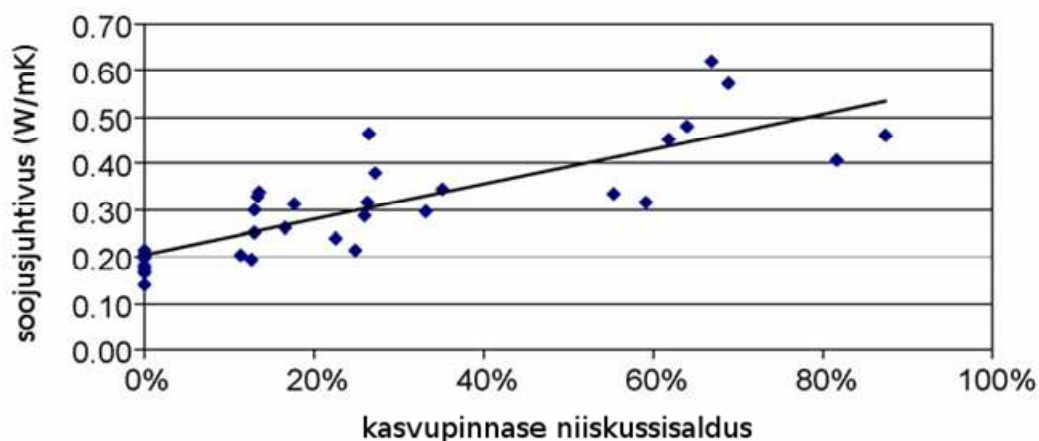
Erineva paksusega kasvupinnase puhul murukatuste summaarne jahutusvõime pinnasekihi paksusest ei sõltu – kihi paksusest sõltub vaid katusest atmosfääri suunatud energivoog varieeruvus ning see, kui “õigel” ajal katus hoonet jahutab [Theodosiou 2003].

Kasvupinnase tiheduse mõju murukatuses toimuvatele protsessidele saab seletada pinnase soojusjuhtivuse muutumisega. Mida väiksema tihedusega on pinnas, seda väiksem on selle soojusjuhtivus ning soojuseenergia edasikandumine pinnases aeglustub. Ühelt poolt kaitseb see katusealuseid ruume soojenemise eest, kuid samas on takistatud ka vastupidine soojuseenergia edasikandumine, mistõttu väheneb murukatuse jahutusvõime. Kokkuvõttes on leitud, et summaarne hoonest atmosfääri suunatud energivoog sel juhul siiski väheneb [Palomo Del Barrio 1998].

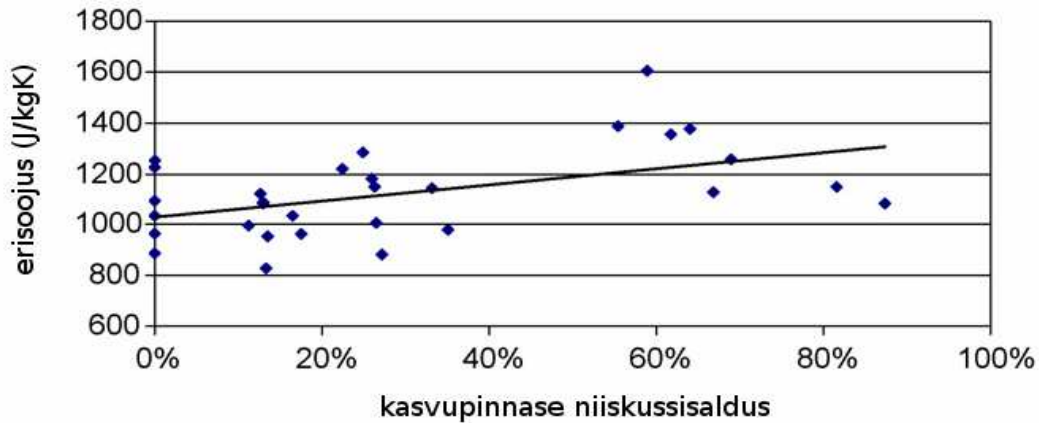
Kasvupinnase paksusele ja tihedusele lisaks mängib murukatuse jahutusvõime reguleerimisel olulist rolli pinnase niiskusesisaldus. Suurenenud niiskusesisaldus suurendab pinnase soojusmahtuvust ehk termilist inertsust. Suurenenud niiskusesisalduse tingimustes on ka evapotranspiratsioon soodustatud, mistõttu murukatuse jahutusvõime võiks olla suurem. Mõningad uurijad loevad kasvupinnase niiskusesisaldust üheks võtmeteguriks kasvupinnase omaduste kujunemisel. Nimelt on uuringud näidanud, et ekstensiivsete murukatuste korral kasutatavad substraadid

erinevad oma omadustelt looduslikest pinnastest ning on sõltuvalt koostisest väga varieeruvate omadustega. Õhukese ja valdavalt kergest poorsest materjalist koosneva substraadi puhul määrab eelpool kirjeldatud termiliste omaduste varieeruvuse just substraadi niiskussisaldus. Kasvupinnase soojusjuhtivuse seos niiskussisaldusega on esitatud joonisel 1.8, millest lähtuvalt suureneb kasvupinnase soojusjuhtivus ligikaudu $0,038 \text{ W/(mK)}$ võrra niiskussisalduse suurenemisel 10% võrra. Kasvupinnase erisoojuse seos pinnase niiskussisaldusega on esitatud joonisel 1.9, millest lähtuvalt kasvupinnase erisoojus suureneb 32 J/(kg K) võrra niiskussisalduse suurenemisel 10% võrra [Sailor et al. 2008].

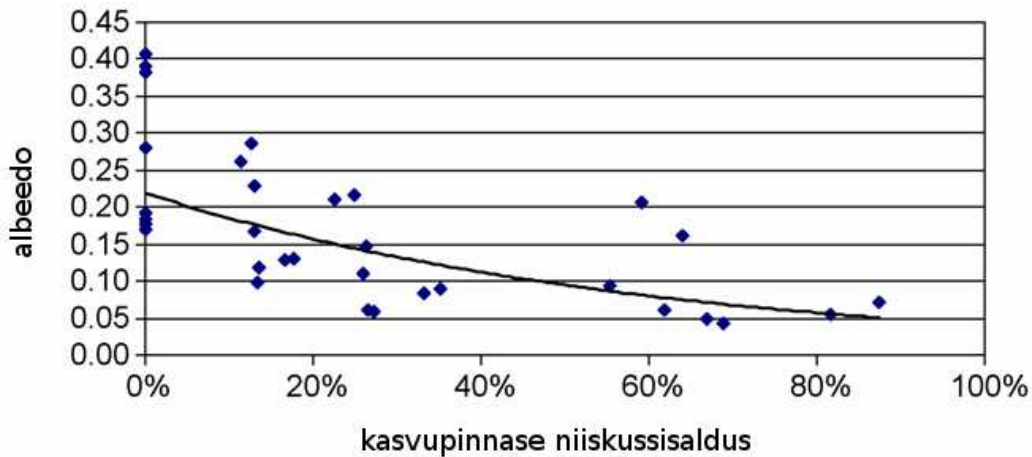
Substraadi niiskussisaldus mõjutab üsna suurtes piirides ka kasvupinnase väliskihi kiirguslikke omadusi. Kasvupinnase niiskussisalduse suurenemisel 60 protsendini langes kasvupinnase albeedo võrreldes kuiva pinnasega enam kui kaks korda. Albeedo on pinna peegeldusvõimet iseloomustav füüsikaline suurus, mis näitab pinnalt peegeldunud summaarse kiirgusvoo suhet sellele pinnale langevasse summaarsesse kiirgusvoogu. Seos kasvupinnase niiskussisalduse ning albeedo vahel on esitatud joonisel 1.10 [Sailor et al. 2008].



Joonis 1.8. Kasvupinnase soojajuhtivus sõltuvalt kasvupinnase niiskusesisaldusest (%) [Sailor et al. 2008 järgi].



Joonis 1.9. Kasvupinnase erisoojus sõltuvalt kasvupinnase niiskusesisaldusest (%) [Sailor et al. 2008 järgi].



Joonis 1.10. Kasvupinnase albedo sõltuvalt kasvupinnase niiskusesisaldusest (%) [Sailor et al. 2008 järgi].

1.4.3. Katuse kalle ja orientatsioon

Kuigi murukatuste peamine linnaökoloogiline funktsioon ja kasutusala realiseerub suurepindalaliste lamekatuste katmisel, tahavad tänapäeval ka mitmed eramuomanikud kasu lõigata murukatuse jahutavatest ning müra summutavatest omadustest. Erinevalt suurtest tööstus- ja kontorihoonetest on eramajad enamasti kaetud kald- ja viilkatustega. Tänapäeval on uute tehnoloogiate ning materjalide kasutuselevõtu tõttu võimalik murukatusega katta kuni 40 kraadise kaldega katuseid. Olgu ära märgitud, et sellistel juhtudel saab tegemist olla vaid ekstensiivsete

murukatustega. Nii suur kalle mõjutab loomulikult ka murukatusel toimuvaid protsesse.

Esiteks, erinevalt lamekatusest sõltub murukatusesse jõudev vee hulk lisaks sademete hulga ka katuse kaldest, orientatsioonist ning tuule suunast ja kiirusest. See seletub sellega, et kaldega katus võtab horisontaalses dimensioonis enda alla vähem pinda kui tema enda pindala on. Kuna vihmapiiskade langemisnurk ja suund on ära määratud tuulekiirusega, siis piiskade langemisnurgaga samasuunaline ja sama kaldega katus püüab tunduvalt vähem sademeid, kuna piisad langevad temast “mööda”.

Sõltuvalt kalde suurusest on pinnasekihist läbi imbunud vee äravool soodustatud, sest erinevalt lamekatusest tõmbab gravitatsioon vett mööda dreanaažikihi kaldpinda allapoole. Seetõttu on kaldu asetseva murukatuse niiskusesisaldus samade ilmastikutingimuste juures väiksem kui lamekatusel [Mentens *et al.* 2003a].

Samuti on mõjutatud kõik päikesekiirgusega seotud protsessid, sest kaldu asetseva katuse korral muutub päikesekiirguse langemisnurk, mistõttu neeldunud kiirgusvoost saadud energiahulk on erinev. Teiseks sõltub kaldu asetseva pinna orientatsioonist see, kui palju ta üldse päikesekiirgusele eksponeeritud on.

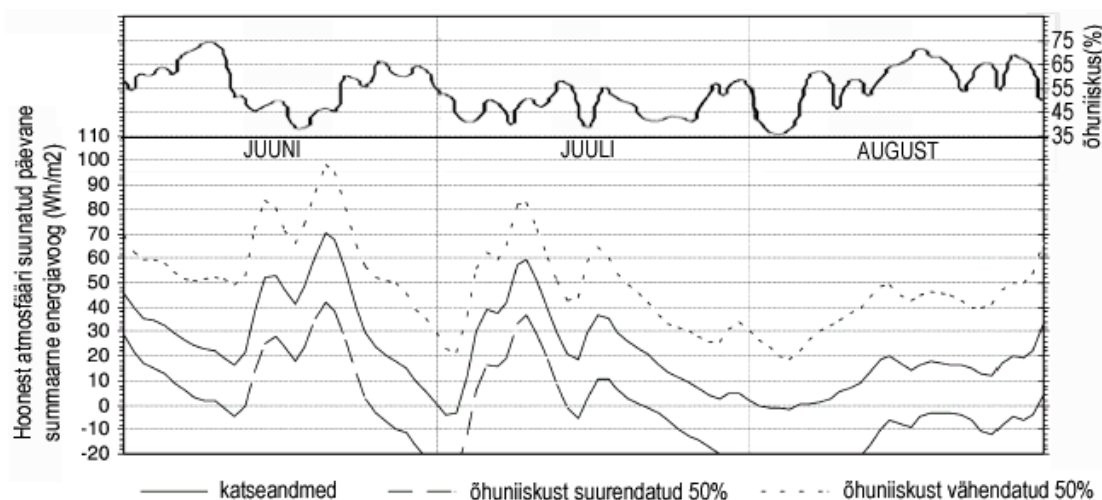
Uuringud on näidanud, et sõltuvalt kaldu asetseva murukatuse orientatsioonist on evaporatsiooni hulk erinev. Erinevus on seda suurem, mida suurem on katuse kaldenurk [Mentens *et al.* 2003a, Mentens *et al.* 2003b]. Kuna see on tingitud päikesekiirguse langemisnurga muutumisest, siis sarnane korrelatsioon peaks kehtima ka transpiratsiooni kohta, kuna see sõltub samast parameetrist.

1.4.4. Kliimaatilised parameetrid

Kuna olulisim protsess murukatuse jahutusvõime seisukohast on evapotranspiratsioon, siis evapotranspiratsiooni mõjutavad ilmatikutingimused on väga olulised. Kõige olulisim neist on suhteline õhuniiskus. Kuiv keskkond suurendab evapotranspiratsiooni ning seega ka murukatuse jahutusvõimet. Niiskes keskkonnas on evapotranspiratsioon minimaalne ja murukatus vaid ühtlustab temperatuuri kõikumisi ning taimed hoiavad varjutamisega kasvupinnase kuumenemist ohjes.

Suhtelise õhuniiskuse ning hoonest välja suunatud energeetilise voo vahel esineb pööratud sümmeetria, mida on näha joonisel 1.11. Hoonest välja suunatud

energeetilise voo maksimum esineb paar päeva pärast suhtelise õhuniiskuse miinimumi ning vastupidi [Theodosiou 2003]. Teine oluline evapotranspiratsiooni mõjutav ilmastikutingimus on tuulekiirus. Intensiivsel evapotranspiratsioonil veeauru hulk lehestiku sees kasvab, mistõttu evapotranspiratsioon väheneb. Selleks et evapotranspiratsioon saaks takistamatult kulgeda, peab tuul olema piisavalt tugev, et lehestiku ja väliskeskkonna vahel õhku segada [Theodosiou 2003].

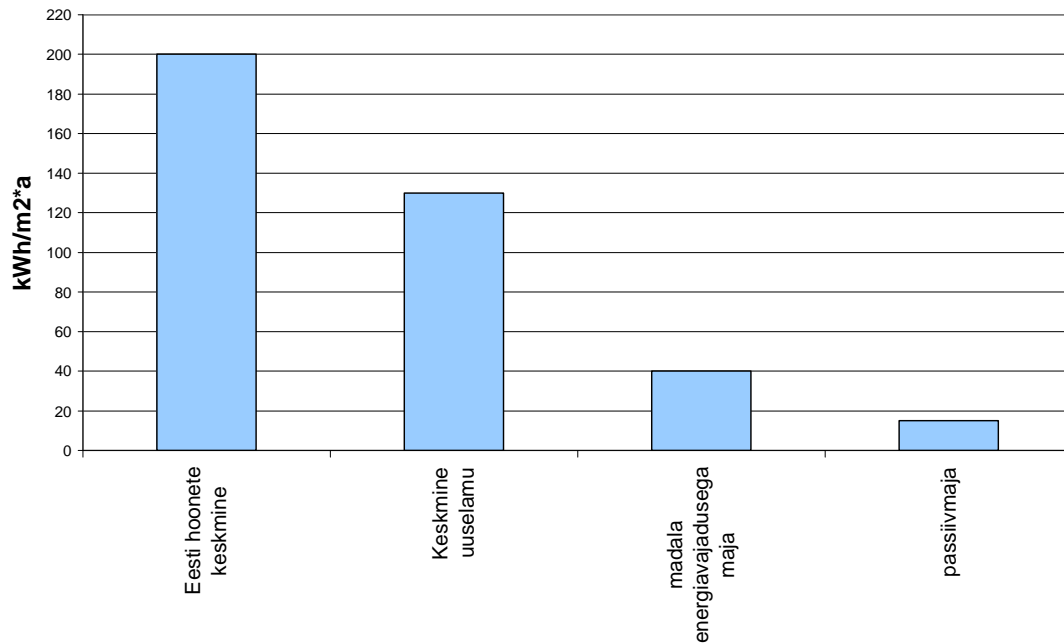


Joonis 1.11. Hoonest atmosfääri suunatud päevane summaarne energiavoog sõltuvalt välisõhu suhtelisest õhuniiskusest. Võrdluseks on ülal lisatud mõõdetud relatiivse õhuniiskuse graafik [Theodosiou 2003 järgi].

1.5. Hoone energiavajadus ja selle varieeruvus Eestis

Selleks, et murukatuse jahutusvõimet adekvaatselt hinnata on vajalik analüüsida seda hoone kui terviku jahutusvajaduse ja energiatarbimise kontekstis. Vastasel juhul saab analüüsi käigus küll murukatuse jahutava toime arvuliselt kindlaks määrata, kuid selle osakaal ja seeläbi ka osatähtsus kogu hoone jahutusvajaduses ning energia tarbimises jääb selgusetuks.

Tartu Ülikooli Energiatõhusa ehituse tuumiklabori andmetel jääb Eesti olemasoleva hoonepargi keskmine energiavajadus ruumiõhu kütteks suurusjärku 200 kWh hoone köetava põrandapinna ruutmeetri kohta aastas (joonis 1.12). Keskmise uuslamu vastav näitaja on 130 kWh/m²*a, energiatõhusa ehk madala energiavajadusega hoone puhul 40 kWh/m²*a ning nn „passiivmaja“ puhul 15 kWh/m²*a.



Joonis 1.12. Keskmise uuslamu, energiatõhusa elamu ning nn „passiivmaja“ aastane kütteenergia netovajadus võrreldes kogu Eesti olemasoleva hoonepargi keskmise kütteenergia netovajadusega [TÜ Energiatõhusa ehituse tuumiklabori andmetel].

Kuna 2008. aasta alguseni ei olnud Eestis hoonete energiatõhusus seadusega mingilgi määral reguleeritud, siis esimesi madala energiatarbega maju ning nn „passiivmaju“ alles ehitatakse.

Elektriseadmete, valgustuse ja tehnosüsteemide energiatarve on mõnevõrra varieeruv, kuid lisab hoonete energiatarbimisele keskmiselt juurde suurusjärgus 30 kWh/m²*a. Vahemikus 30 kuni 50 kWh/m²*a lisab sõltuvalt kasutusest hoone summaarsele energiatarbimisele ka tarbevee soojendamise.

Hoone energiavajadus ruumiõhu jahutamiseks sõltub väga palju hoone geometriast, akende hulgast ja paiknemisest, hoone tüübist ja sisekasutusest (elamu, büroohoone jne) ning hoone välispiirete omadustest. Halvasti projekteeritud hoonete korral (nt suurte lõunapoolsete klaasfassaadidega büroohooned) kujuneb jahutusvajadus väga suureks ning jahutamiseks kuluv energiahulk võib olla suurem kui eelpool kirjeldatud ruumiõhu soojendamiseks vajalik energiahulk kütteperioodil.

Jahutusvajadus tekib hoonetes ruumi siseneva lühilainelise kiirguse (päikeseenergia) muundumisel soojuskiirguseks, sisetemperatuurist kõrgema välistemperatuuri või otsese päikesekiirguse mõjul kuumenenud välispiirde välispinna

tõttu läbi hoone piirde hoonesse siseneva soojavoo toimel ning läbi inimeste ja elektriseadmete soojaeralduse. Lähtuvalt eelmistes peatükkides kirjeldatud protsessidest on murukatuse võimalik jahutav toime seotud võimega varjata katusepinda otsese päikesekiirguse eest. Samuti neelab energiat kasvupinnases sisalduva vee evapotranspiratsioon. Kui suur mõju neil protsessidel Eesti kliimas mõne konkreetse hoone jahutusvajadusele on selgub käesoleva töö praktilises osas kui hoonesimulatsiooni abil analüüsitakse konkreetse hoone katust läbivaid soojavoogusid ning ruumiõhu temperatuuride ja jahutusvajaduse dünaamikat.

1.6. Hoonesimulatsiooni vahendid

Vahendeid hoone energiabilansi arvutamiseks ehk erinevate energiaallikate ning energiakadude osakaalude määramiseks on mitmesuguseid ning nende valik sõltub püstitatud küsimuse detailsusest.

Hoone üldise ja pikaajalise energiatarbimise määramiseks on kasutusel mitmesugused staatilised arvutusmeetodid, mis annavad võimaluse hoone aastase või iga kuu keskmise energiatarbe kujunemist hinnata lähtudes pikaajalistest keskmistest kliimaandmetest (nt kuude keskmised õhutemperatuurid, päikese otsekiirguse hulgad jne). Eesti ehituspraktikas on pikaajaliselt kasutusel olnud kraadpäevade meetod, mis lähtub Eesti erinevate piirkondade pikaajalisest temperatuuriandmestikust. Selle miinuseks on teiste oluliste kliimaparameetrite nagu päikese otsekiirguse hulgad, tuule kiirus ja suund jms mitteamestamine. Alternatiivse staatilise energiabilansi arvutusmeetodina on praktikas kasutusel Euroopa standardi EVS-EN ISO 13790:2004 „*Thermal performance of buildings – Calculation of energy use for space heating*“ kohane meetodika, mis arvestab lisaks väliskeskkonna temperatuurile ka muid väliskeskkonna parameetreid. Kuigi nimetatud meetodika on piisavalt täpne hoonete aastase või hooajalise energiabilansi määramiseks ei ole sellega võimalik kirjeldada hoone energiabilansi käitumist märksa lühemas ajaskaalas nagu seda nõuab käesolev uurimisprobleem.

On selge, et murukatuses tugeva ööpäevase kõikumisega soojavoogude analüüs eeldab ajaliselt oluliselt detailsemat meetodikat. Vaja on seega integreeriva modelleerimise meetodikat, mis arvestab vaadeldava süsteemi (hoone) detailsust, süsteemi omaduste ajalist varieerumist ning süsteemi parameetrite ja käitumise vaheliste seoste mittelineaarsust [Clarke 2001]. Hoonete modelleerimisel on

tänapäeval jõutud reaalseid protsesse matkivate mudeliteni, mis arvestavad integreeritult hoone komponentides toimuvat energia ülekandumist konduktsiooni, piirete sise- ja välispinnal toimuva konvektsiooni, sise- ja välispinnal toimuva soojuskiirguse neeldumise ja emissiooni, lühilainelise kiirguse neeldumise ja emissiooni ning hoone sees ja läbi hoone piirete toimuva õhu liikumise tagajärjel lahendades erinevate parameetrite omavahelised seosevõrrandid uuesti igal ajahetkel [Clarke 2001]. See võimaldab hoone kui süsteemi käitumist simuleerida väga tiheda ajasammuga ning väga lähedaselt süsteemi reaalsele käitumisele. Praktikas sõltub ajasammu valik uuritavast probleemist ning sellele vastavast muutlike lähteandmete (nt kliimaparameetrid) ajalisest kirjeldatusest. Valdavalt kasutatakse analüüsil lähteandmeid 1 tunnise ajasammuga. Eelpool toodud põhimõtete järgi hoone energiabilansi arvutamist nimetatakse dünaamiliseks hoonesimulatsiooniks.

Dünaamiline hoonesimulatsioon annab võimaluse parameetriselt analüüsida suurt hulka mõjutegureid, mis hoone energiabilansi ja sisekliimat puudutavad ning lahendada suurt hulka igasuguseid eriküsimusi alustades erinevate hoonekomponentide valiku mõjust hoone energiatarbimisele ja lõpetades ruumiõhu temperatuurikäikude ja suviste ekstreemumitega. Integreerides murukatuse mudeli olemasolevate hoonesimulatsiooni mudelitega saamegi hinnata murukatuse mõju hoone energiabilansi ja sisekliima kujunemisele.

Dünaamilise hoonesimulatsiooni mudelite täpsus ja reaalsete protsesside jälgendamise adekvaatsus tagatakse mudelite valideerimisel vastavalt ISO (International Organization for Standardization) asjakohastes standardites või IEA (International Energy Agency) BESTEST standardites toodud meetodikatele ja reaalsetes hoonetes mõõdetud võrdlusandmete analüüsil.

Kümnetest hoonesimulatsiooni mudelitest ja nendega seotud keskkondadest võib välja tuua mõningad peamised, mida on massiliselt uuritud ning korduvalt valideeritud. Nendeks on TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation Program), ESP-r ning EnergyPlus.

Hoonete dünaamiline simulatsioon on väga mahukas eraldiseisev teema ning seetõttu jääb selle detailsem käsitlemine väljapoole käesoleva töö mahtu.

1.7. Kliimaandmestik hoonesimulatsioonil

Nagu eelnevalt märgitud on hoones toimuvate protsesside kirjeldamiseks vaja detailseid ja piisavalt täpse ajalise sammuga sisendandmeid. Suhteliselt lihtne oleks hoonesimulatsioonil kasutada reaalse aastate kliimaparameetrite aegridasid iga konkreetse geograafilise piirkonna kohta. Selliste andmete kasutamise miinuseks on asjaolu, et ilmastikuparameetrid on samas asukohas aastate lõikes üsna varieeruvad ning hoonesimulatsioonil pakub uurijatele pigem huvi hoone toimimine pikema perioodi jooksul ning hoonete pikaajaline keskmine energiatarbimine.

Eesmärgiga säilitada parameetrite ajaline varieeruvus kuid tagada nende summaarne esinduslikkus keskmiste kliimatingimuste suhtes kasutatakse hoonesimulatsioonil ilmastikuparameetrite pikaajaliste mõõtmistulemuste põhjal valitud või konstrueeritud tüüpilise aasta andmestikku.

Metoodikaid pikaajaliste vaatlusandmete põhjal kliimaatilisel tüüpilise aasta valimiseks või konstrueerimiseks on mitmeid. ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) testaasta meetodika (ASHRAE TRY) kohaselt toimub tüüpilise aasta valik pikaajalisest aegreast erinevate kuude keskmiste välisõhutemperatuuride alusel ekstreemsemate aastate välistamisel. Selleks määratakse pikaajaliste mõõtmisandmete (nt 30 aastase perioodi kohta) põhjal kindlaks kõige kõrgema ja kõige madalama keskmise temperatuuriga kuud jaanuarist detsembrini ning kõik vastavad aastad eemaldatakse edasisest valikust. Protsessi korratakse kuni valikusse jääb alles vaid üks aasta esialgsest valimist. Järele jäänud aasta andmed loetaksegi vastava asukoha tüüpilist kliimat iseloomustavaks aastaks [Kalamees and Kurnitski 2006].

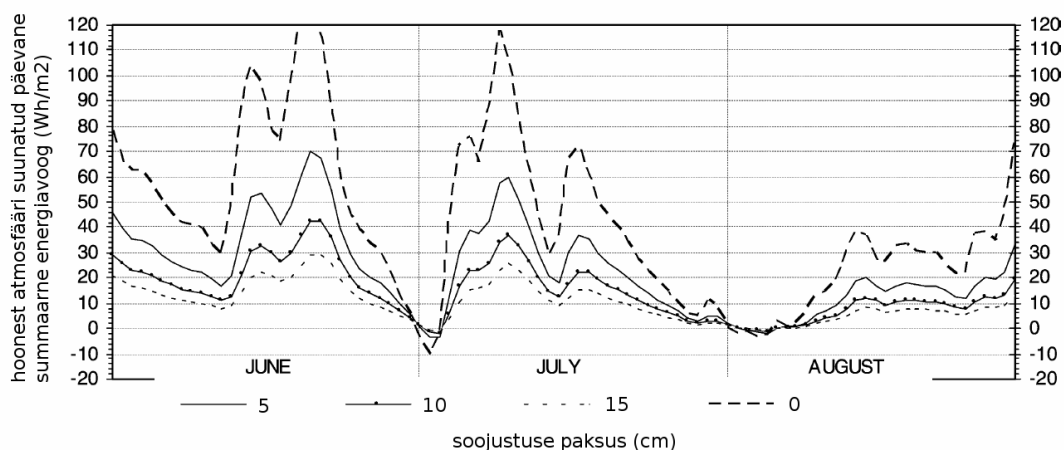
Alternatiivne võimalus on tüüpaasta andmestik konstrueerida. Selleks analüüsitakse valitud asukoha pikaajalist meteoparameetrite andmestikku (nt 30 aastase perioodi kohta) ning valitakse andmestikust statistiliste meetodite abil välja kõige rohkem vastava asukoha keskmist kliimat iseloomustavad kuud. Lisaks välisõhu temperatuurile kasutatakse analüüsil ka mitmeid teisi olulisi parameetreid nagu päikese summaarne kiirgushulk, tuulekiirus, kastepunkt jne. Erinevatest reaalistest aastatest valitud kuude andmestiku järjestamisega konstrueeritaksegi nõ keskmine tüüpaasta, milles kuudevahelisi üleminekuid ajas sujuvalt muutuvate parameetrite osas (õhutemperatuur, õhuniiskus) statistiliste vahenditega silutakse. Täpsed statistilised meetodid tüüpiliste kuude valimisel ja valiku aluseks olevate

parameetrite hulk on sõltuvalt aluseks olevast standardist erinevates riikides veidi erinev. Eestis on *Eesti energiaarvutuste testaasta* koostamisel lähtud ISO 15927-4:2005 standardis kirjeldatud meetodikast [Kalamees and Kurnitski 2006].

Alternatiivseks võimaluseks kliimaandmestiku koostamiseks asukohtades, mille kohta puudub piisav pikaajaline mõõteandmestik on kasutada lähimate meteojaamade andmete interpoleerimist. Selle protsessi hõlbustamiseks on Šveitsis asuva ettevõtte poolt kokku pandud rahvusvahelise ilmavaatlusjaamade võrgustiku mõõteandmeid koondav andmebaas ning pidevalt täienev andmete interpoleerimise algoritmide kogum Meteonorm METEOTEST tarkvarapaketi näol, mille abil saab soovitud geograafilise asukoha kohta vajaliku andmerea sünteesida. Kuna paljude meteoparameetrite varieeruvus ruumis ei ole lineaarne, siis on sellisel meetodil koostatud andmestik mõnevõrra ebatäpsem ning selle kasutamine on soovituslik vaid otseste mõõteandmete puudumisel.

1.8. Katusekonstruktsiooni soojustamisest Eestis ning selle võimalikust mõjust murukatuse jahutusvõimele

Soojavoo suurus läbi katusekonstruktsiooni sõltub katusekonstruktsiooni soojatakistusest, temperatuuride erinevusest konstruktsiooni sise- ja välispindadel ning katusekonstruktsiooni sise- ja välispinna kiirguslikest ja konvektiivsetest omadustest. Kui murukatus ja selles toimuvad protsessid mõjutavad eelkõige katuse välispinnal valitsevaid temperatuure ja selle kiirguslikke ja konvektiivseid omadusi ning kasvupinnase niiskussisalduse kaudu osaliselt ka katusekonstruktsiooni soojatakistust, siis katusekonstruktsiooni soojatakistusele omab hoopis olulisemat mõju katuses kasutatud soojustusmaterjali kihi paksus ning kasutatud materjali erisoojusjuhtivus. Ühes murukatuse jahutusvõimet käsitlevas uurimuses analüüsiti parameetriselt katuse soojustuskihi mõju katust läbivale soojavoole ning tuvastati soojavoo oluline vähenemine paksema soojustuskihi kasutamisel. Vastavad andmed on esitatud joonisel 1.13 [Theodosiou 2003].



Joonis 1.13 Hoonest atmosfääri suunatud päevane summaarne energiavoog sõltuvalt katusekonstruktsioonis kasutatud soojustusmaterjali paksusest. [Theodosiou 2003 järgi].

Kuna Eesti asub kliimaatiliselt piirkonnas, kus talveperioodil langevad õhutemperatuurid oluliselt alla 0 °C, siis sisaldub katusekonstruktsioonides alati ka mingi kogus soojustusmaterjale. Soojustuskihi paksus on sõltuvalt hoonest ja selle ehitamise ajal kehtinud normatiividest mõnevõrra varieeruv. Eestis kehtivad ehitusnormid sätestavad katuslae maksimaalseks soojajuhtivuseks 0,22 W/m²*K, mis tähendab keskmise mineraalse soojustusmaterjali puhul lisaks kandvale konstruktsioonile ja ca 30mm tuuletõkkehile ligikaudu 15 cm paksust soojustusmaterjali kihti. 2008. aasta jaanuaris vastu võetud Vabariigi Valitsuse määrus *Energiatõhususe miinimumnõuded* annavad soovitusel väikeelamute puhul tagada katuslae soojajuhtivus vahemikus 0,15 – 0,2 W/m²*K, mis on saavutatav vastavalt 23,5 cm ja 17 cm paksuse soojustusmaterjali kihiga.

Lähtudes joonisel 1.13 esitatud tulemustest on ilmne, et katusekonstruktsioonis esinev soojustuskiht pärsib murukatuse jahutusvõimet. Seetõttu on käesoleva töö praktilises osas oluline analüüsida murukatuse jahutusvõimet just soojustatud katusega hoonete puhul, kuna valdav osa olemasolevast ning rajatavast hoonepargist on soojustatud katuslaega.

2. Materjal ja metoodika

2.1. Analüüsil kasutatud murukatuse mudel

Käesoleva töö praktiline osa võtab aluseks murukatuse matemaatilisel mudeli, mis on loodud Portland State University uurijate poolt ning mooduli kujul integreeritud dünaamilise hoonesimulatsiooni tarkvaraga EnergyPlus [Sailor 2008].

Loodud mudel arvestab murukatuses toimuvat lühi- ja pikalainelise kiirguse neeldumist ja emissiooni taimestikus, taimestiku mõju konvektiivsele soojusülelekandele, evapotranspiratsiooni taimedest ja kasvupinnasest ning soojusülekanne ja soojusakumulatsiooni kasvupinnasekihis.

Mudeli sisendandmeteks on [EnergyPlus Engineering Reference 2008, Sailor 2008]:

- kasvupinnase kihi paksus (m);
- kasvupinnase soojusjuhtivustegur kuivas olekus (W/mK);
- kasvupinnase tihendus (kg/m^3);
- kasvupinnase erisoojus kuivas olekus (J/kgK);
- kasvupinnase pikalainelise kiirguse neeldumisvõime;
- kasvupinnase lühilainelise kiirguse neeldumisvõime;
- taimestiku tihedus väljendatuna lehepinnaindeksina;
- taimestiku kõrgus (m);
- taimestiku minimaalne õhulõhede juhtivus (s/m);
- taimestikukihi albeedo;
- taimestikukihi neeldumisvõime;
- katuse kastmise intensiivsus (kui suveperioodil kastetakse).

Murukatuse mudel kalkuleerib nimetatud sisendandmete ning täiendavate ilmastikuandmete põhjal temperatuuride käigud murukatuse taimestikukihi välispinnal ning murukatuse kasvupinnases ning suunab saadud tulemused edasi hoonesimulatsiooni mudelisse. Peatükkides 2.3 ja 2.4 kirjeldatud hoonesimulatsiooni mudel kalkuleerib murukatuse mudeli poolt ette antud temperatuuride põhjal kasvupinnase ja selles sisalduva vee soojusmahtuvust arvestades läbi murukatuse ja katuse aluskonstruktsiooni kulgeva soojavoo arvulise väärtuse igal lähteandmetes kindlaks määratud ajasammul. Katust läbiv soojavoog ning selle soojavoo ja

ülejäanud hoone välispiirdeid läbivate soojavoogude, ventilatsiooni kaudu toimuva soojusvahetuse ning inimeste ja seadmete soojaeralduse koosmõjus kujunev ruumiõhu temperatuur on hoonesimulatsiooni mudeli otsesed väljundparameetrid. Analüüsil kasutatud murukatuse mudel baseerub suuresti USA armee poolt tellimusel valminud FASST (*Fast all-season soil strength*) taimeistiku mudelitel [Frankenstein and Koenig 2004a Sailor 2008 järgi, Frankenstein and Koenig 2004b Sailor 2008 järgi] ning atmosfääri ja biosfääri vastasmõju modelleerimisel sageli kasutatavatel BATS (*Biosphere Atmosphere Transfer Scheme*) ja SiB (*Simple Biosphere model*) mudelitel [Dickinson *et al.* 1993 Sailor 2008 järgi, Sellers *et al.* 1986 Sailor 2008 järgi]. Mudeli detailne kirjeldus ning sisend- ja väljundparameetrite vahelised arvulised seosed on täpsemalt kirjeldatud vastavates algallikates [EnergyPlus Engineering Reference 2008, Sailor 2008]. Vastava informatsiooni detailne kirjeldamine käesolevas töös on vastava informatsiooni mahukuse tõttu limiteeritud.

Kirjeldatud mudel valideeriti selle autorite poolt University of Central Florida üliõpilashoone katusele rajatud murukatuse aastapikkuse eksperimentaalse andmestiku põhjal. Mudeli autorite poolt läbi viidud murukatuse mudeli lihtsustatud tundlikkusanalüüs loodud mudelile näitas, et suurimat mõju katust läbivale soojavoole avaldas kasvupinnase kihi paksus, kusjuures kasvupinnase kihi paksuse kasvades, kasvas katuse soojapidavus ning vähenesid suvised katust läbivate soojavoogude maksimumid. Veidi madalamat, kuid siiski olulist mõju avaldas katust läbivale soojavoole taimeistiku tihedus, mis on defineeritud läbi keskmise lehepinnaindeksi väärtuse. Lehepinnaindeksi kasvades katust läbiva soojavoo maksimumid vähenesid ning kahanedes kasvasid vastavalt. Murukatuse suvise kastmise intensiivsuse kahekordistamine vähendas katust läbiva soojavoo maksimume, kuid efekt oli võrreldes eelnevalt kirjeldatud parameetritega tagasihoidlikum [Sailor 2008].

Käesoleva uurimistöös praktilises osas valiti murukatuse mudeli sisendandmeteks vastavate muutujate keskmised väärtused. Lisaks keskmiste väärtustega nõ baasvariandile (BV) varieeriti peamisi murukatuse jahutusvõimet mõjutavaid parameetreid, milleks olid taimeistiku katvust ja tihedust väljendav keskmine lehepinnaindeks (LAI) ning kasvupinnase paksus. Kuna ekstensiivse murukatuse puhul on taimeistik madal ning selle kõrgus ei saa liigilisest koosseisust tulenevalt oluliselt varieeruda siis analüüsil taimeistiku kõrguse mõju eraldi ei analüüsitud. Sisendandmete väärtused analüüsitud murukatuse variantide lõikes on loetletud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Modelleeritud murukatuse sisendandmed erinevate analüüsitud variantide lõikes.

	baasvariant (BV)	suurem LAI	väiksem LAI	paksem pinnas	õhem pinnas
kasvupinnase kihi paksus (m)	0,1	0,1	0,1	0,15	0,05
kasvupinnase soojusjuhtivustegur kuivas olekus (W/mK)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
kasvupinnase tihedus (kg/m ³)	500	500	500	500	500
kasvupinnase erisoojus kuivas olekus (J/kgK)	1000	1000	1000	1000	1000
kasvupinnase pikalainelise kiirguse neeldumisvõime	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
kasvupinnase lühilainelise kiirguse neeldumisvõime	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
taimestiku tihedus väljendatuna lehepinnaindeksina	2	3	1	2	2
taimestiku kõrgus (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
taimestiku minimaalne õhulõhede juhtivus (s/m)	180	180	180	180	180
taimestikukihi albeedo	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
taimestikukihi neeldumisvõime	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
katuse kastmise intensiivsus	ei kasteta	ei kasteta	ei kasteta	ei kasteta	ei kasteta

2.2. Analüüsil kasutatud kliimaandmestik

Kuna käesoleva töö raames oli eesmärk uurida murukatuse võimalikku jahutavat mõju nõ pikemaajalise ekspluatatsiooni puhul, siis ei lähtunud praktilistes arvutustes ühestki konkreetse aasta kliimaandmestikust vaid valiti pikaajaliste vaatlusandmete põhjal kogu Eesti kohta koostatud *Eesti energiaarvutuste testaasta* andmestik. *Eesti energiaarvutuste testaasta* koostamisel on lähtud ISO 15927-4:2005 standardis kirjeldatud metoodikast [Kalamees and Kurnitski 2006]. Nimetatud kliimaandmestik on konstrueeritud kasutades algandmestikuna aastatel 1970 kuni 2000 Eesti meteoroloogia ja hüdroloogia instituudi (EMHI) mõõdetud parameetreid Tallinna, Kuressaare, Pärnu, Tartu, Tõravere, Väike-Maarja ning Võru kohta. Esmane valik erinevate reaalsete aastate kuude hulgast ebasobivate välistamiseks tehti välisõhu temperatuuri, summaarse päikesekiirguse hulga ning veeauru osarõhu põhjal. Sekundaarse parameetrina arvestati keskmisest erinevate kuude välistamisel tuule kiirust. Kuna järjepidev andmestik summaarse päikesekiirguse kohta oli vaadeldud mõõteperioodi kohta olemas vaid Tartu mõõteandmestikus, siis reaalsete kuude

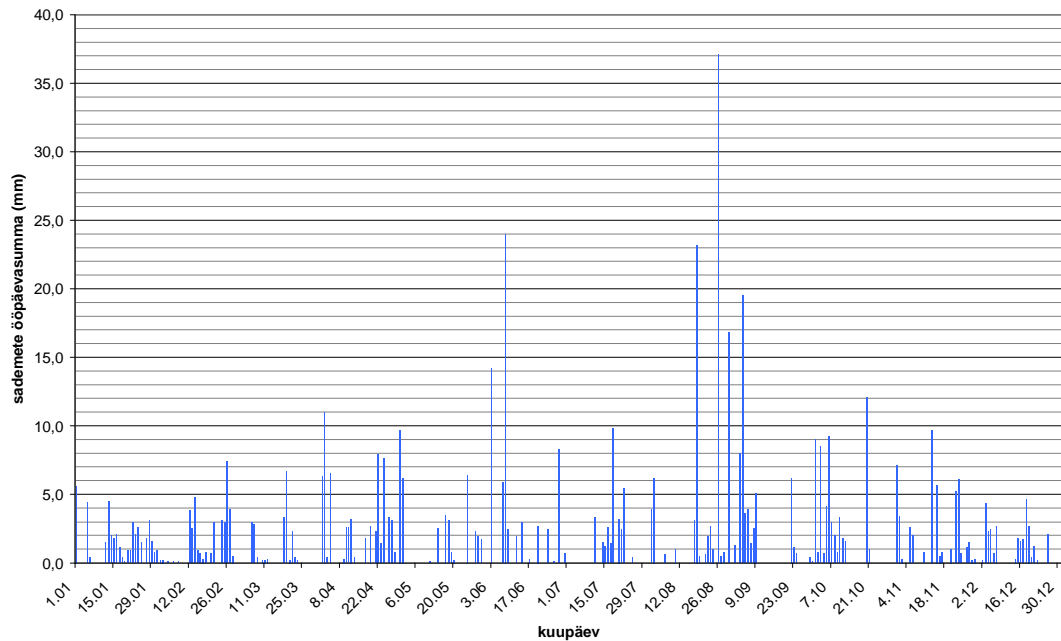
tunniandmed lõpliku aastase andmestiku konstrueerimiseks võeti just Tartu erinevate aastate mõõtetulemustest. Aastad, mille reaalsete kuude tunniandmetest *Eesti energiaarvutuste testaasta* andmestik konstrueeriti on esitatud tabelis 2.2 [Kalamees and Kurnitski 2006].

Tabel 2.2. Reaalsete kuude loetelu, millest konstrueeriti *Eesti energiaarvutuste testaasta* [Kalamees and Kurnitski 2006 järgi].

Konstrueeritud testaasta kuu	konstrueeritud testaastasse valitud reaalsed Tartu mõõteandmed
jaanuar	1994. a jaanuar
veebruar	1991. a veebruar
märts	1973. a märts
aprill	1970. a aprill
mai	1977. a mai
juuni	1984. a juuni
juuli	1991. a juuli
august	1990. a august
september	1982. a september
oktoober	1990. a oktoober
november	1989. a november
detsember	1979. a detsember

Eesti energiaarvutuste testaasta sisaldab tunniandmeid järgmiste parameetrite kohta: õhutemperatuur (°C), suhteline õhuniiskus (%), tuule kiirus (m/s), tuule suund, päikese otsekiirgus (W/m²) ning päikese hajuskiirgus horisontaalpinnal (W/m²) Kõigi nimetatud parameetrite aastane käik on graafikuna esitatud Lisas 1.

Kuna *Eesti energiaarvutuste testaasta* andmestikust puudus murukatuse modelleerimiseks vajalik sademete hulk, siis täiendasin kirjeldatud andmestikku EMHI käest tellitud sademete andmetega tabelis 2.2 toodud kuude osas. Vastavad andmed on esitatud joonisel 2.1. Kuna EMHI-l puudusid osade valitud kuude osas tunniandmed, lähtusin nende poolt edastatud vastavate kuude sademete ööpäevasummadest jagades sademete kohta tunniandmete saamiseks sademete ööpäevase hulga ühtlaselt 24 tunni peale. Uuringud on näidanud, et murukatus omab võimet sademevee koguseid puhverdada ning sademevee äravoolu katuselt mitmeid tunde pikendada [Teemusk 2005, Teemusk and Mander 2007]. Seetõttu võib ööpäevaste sademetehulkade ühtlustamist ööpäeva tunniandmeteks aktsepteerida.



Joonis 2.1. Eesti energiaarvutuste testaasta andmestikule lisatud sademete ööpäevasummad (allikas: EMHI).

Sademete andmete integreerimiseks simulatsiooniprogrammiga struktureerisin ja vormindasin need vastavalt simulatsioonikeskkonna sisend-väljund muutujate käsiraamatule [EnergyPlus Input/Output Reference 2008], mis võimaldas need ASCII-vormingus simulatsiooni lähtefaili kopeerida.

2.3. Arvutustel kasutatud dünaamilise simulatsiooni tarkvara

Analüüsi läbiviimiseks kasutati dünaamilise hoonesimulatsiooni mudeli EnergyPlus versiooni 2.1.0.023. EnergyPlus-i näol on tegemist kaasaegse modulaarse hoonesimulatsiooni mudeliga, mis on võimeline modelleerima tunnise või tihedama ajasammuga hoone sisekliimat, energiatarbimist ning energiabilanssi lähtudes kasutaja poolt detailselt kirjeldatud hoone välispiiretest, geomeetriast, sisekasutusest, hoone tehnosüsteemide töögraafikutest ning meteoparameetrite andmestikust.

Peatükis 2.1 kirjeldatud murukatuse mudel on moodulina inkorporeeritud EnergyPlus mudelisse.

2.4. Analüüsil kasutatud hoonemudelite kirjeldus

Murukatuse jahutusvõime analüüsiks reaalse hoone näitel koostati Tartus Näituse tn 22 asuva hoone põhiprojekti jooniste ning seletuskirja alusel detailne kolmemõõtmeline hoone mudel koos välispiirete, tehnosüsteemide ning elamule tüüpilise sisekasutuse detailse kirjeldusega. Tegemist on viiekordse korterelamuga, mis valmis 2003. aastal. Joonisel 2.2 on esitatud Näituse tn 22 hoone mudeli visualiseering. Hoone välispiirete soojusjuhtivuse näitajad ning olulisemad sisekasutuse ning tehnosüsteemide parameetrid on esitatud lisas 2.



Joonis 2.2. Analüüsitud hoonemudeli kolmemõõtmeline vaade.

Hoone katuslae konstruktsioon sisaldab projektikohaselt 20 cm EPS soojustusmaterjali ning 3 cm mineraalvilla, mille korral kogu katusekonstruktsiooni soojajuhtivustegur $U = 0,157 \text{ W/m}^2\text{K}$. Hoone katuse pindala on ca 410 m^2 .

Eesmärgiga hinnata murukatuse jahutusvõimet ka vähem soojustatud katusekonstruktsiooni korral loodi kaks esialgselt identset hoone mudelit, mille katusekonstruktsioon oli esimesel juhul täiesti soojustamata ning teisel juhul sisaldas 15 cm mineraalvillast soojustust, mille korral kogu katusekonstruktsiooni

soojajuhtivustegur $U = 0,225 \text{ W/m}^2\text{K}$. See suurus vastab ligikaudu Eestis kehtivates ehitusnormides kehtestatud maksimaalsele soojajuhtivusteguri väärtusele.

2.5. Andmetöötlus

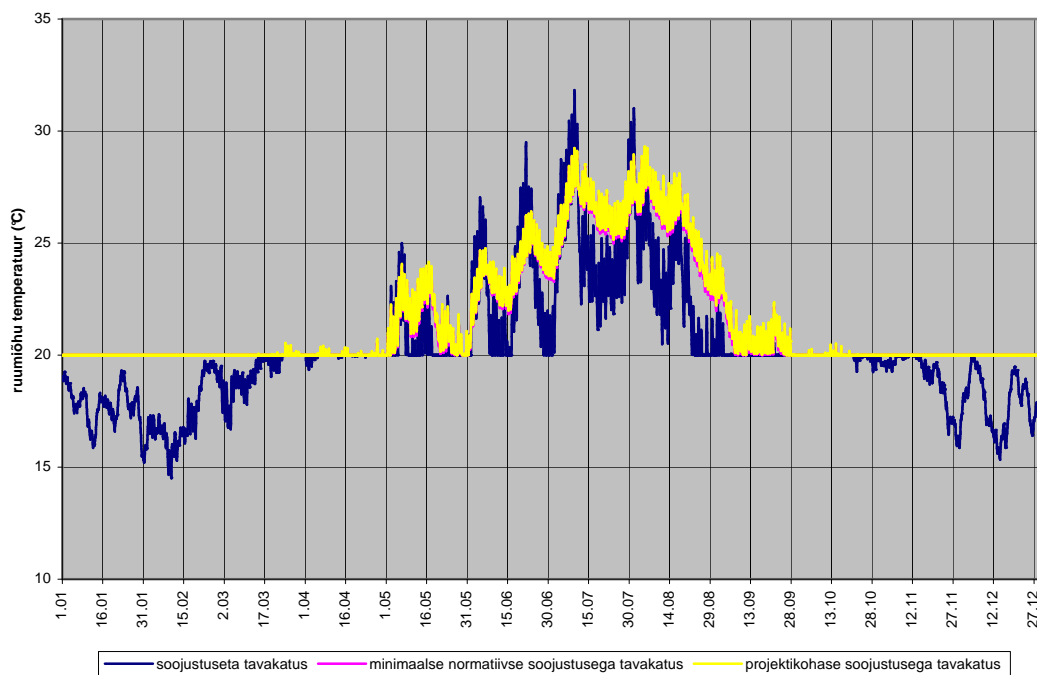
Murukatuse jahutusvõime hindamiseks arvutati dünaamilise hoonesimulatsiooni käigus kolme erineva katuse aluskonstruktsiooniga hoone puhul hoonest läbi katuse välja suunatud soojavoogude väärtused aasta iga tunni kohta bituumenkattega tavakatuse, murukatuse baasvariandi ning veel nelja baasvariandist erineva murukatuse variandi lõikes (kuus katusekatte varianti iga soojustusmaterjali paksuse kohta). Kõigi 18 arvutusvariandi kohta simuleeriti ka ruumiõhu temperatuuride väärtused aasta iga tunni kohta.

Dünaamilise hoonesimulatsiooni käigus arvutatud parameetrite edasiseks analüüsiks kasutati tarkvarapaketi MS Excel vahendeid.

Jahutusvajaduse detailsema analüüsi tarbeks täpse suvise ajavahemiku määratlemisel piiritleti bituumenkattega tavakatuse 3 erineva variandi puhul ajavahemik, mille kestel ruumiõhu temperatuuride kõikumine hakkas ületama $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Piiritletud ajavahemikul koostati ruumiõhu temperatuuride võrdlemiseks nende kumulatiivne sagedusjaotus $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ sammuga vahemikes. Jahutusvajaduse arvuliseks määramiseks arvutati ruumiõhu temperatuuride tunniandmete alusel $25 \text{ }^\circ\text{C}$ piirtemperatuuri ületavate kraadtundide arv. Kraadtund on jahutusvajadust iseloomustav ühik, mis näitab valitud piirtemperatuuri ületamist ühe tunni kestel ühe kraadi võrra.

3. Tulemused ja arutelu

Vaadeldud hoones tekkiva sisetemperatuuride dünaamika tüüpilise kliimaga aasta kestel on kolme erineva aluskonstruktsiooniga bituumenkattega tavakatuse lõikes toodud joonisel 3.1.



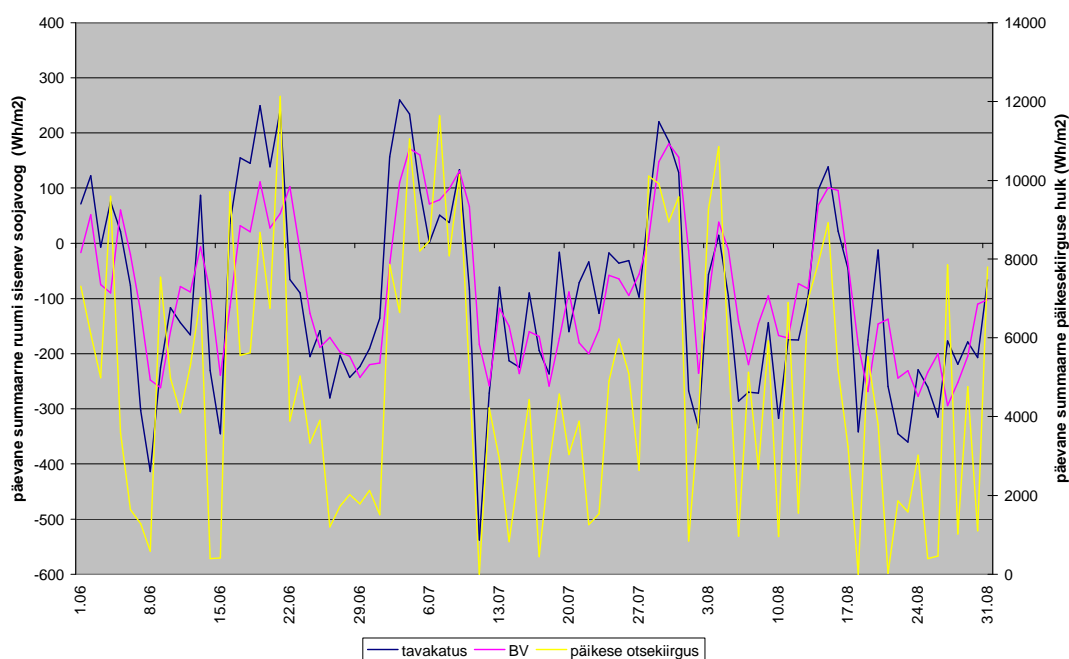
Joonis 3.1. Ruumiõhu temperatuuride aastane dünaamika analüüsitud hoones kolme erineva soojustusmaterjali kihi korral hoone katusekonstruktsioonis.

Vabariigi Valitsuse määrus *Energiatõhususe miinimumnõuded* sätestab piirtemperatuuriks, millest alates hoone jahutust vajab, sõltuvalt hoone tüübist ja kasutusotstarbest 23 °C kuni 27 °C. Suuremal osal juhtudest loetakse jahutusvajaduse alguseks piirtemperatuuri 25 °C. Jooniselt on näha, et ruumiõhu temperatuurid hakkavad 25 °C piiri ületama alates juuni algusest ning kõrgele ulatuvad temperatuurikäigud kestavad ligikaudu augusti lõpuni.

3.1. Katuse soojustamata

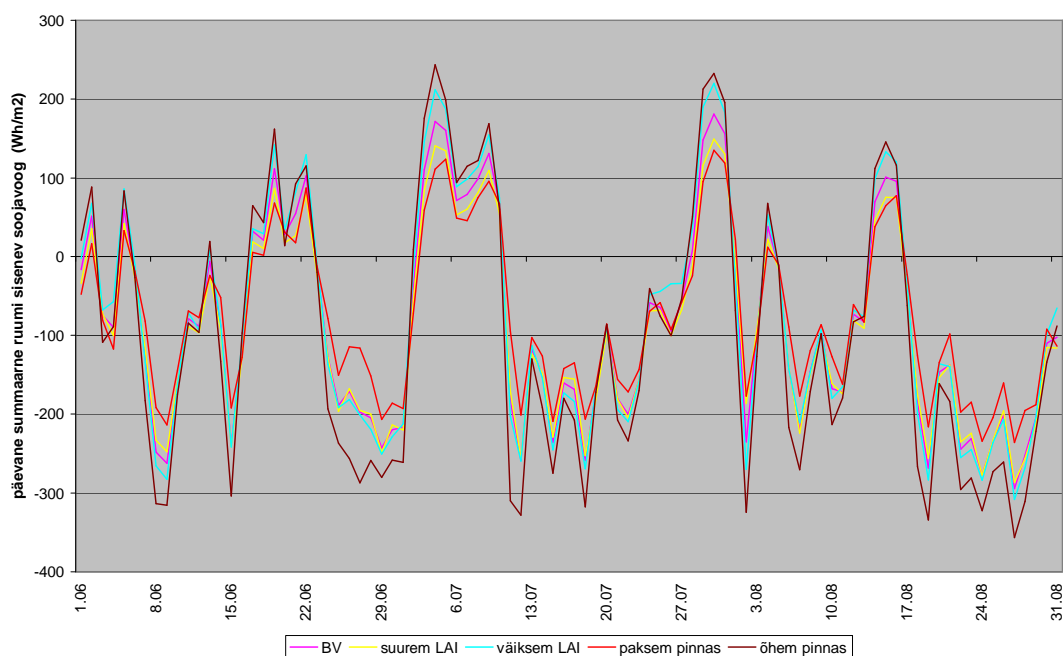
Joonisel 3.1 on esitatud summaarsete päevaste soojavoogude dünaamika tavakatuse ja murukatuse baasvariandi lõikes. Jooniselt on näha, et sõltuvalt päikesekiirguse intensiivsusest on läbi katuse hoonesse tungiv soojavoog päevade

lõikes erinev ulatudes päikesepaistelisel päeval 260 Wh/m² kuni -540 Wh/m². Negatiivne soojavoog näitab seejuures energia kandumist läbi katuse hoonest välja. Varasemates uuringutes, milles analoogseid suurusi on võrreldud on läbi katuse hoonest välja suunatud soojavood olnud mõnevõrra väiksemad ulatudes kuni -120 Wh/m² ööpäevas [Theodosiou 2003]. Tõenäoliselt on see seotud uuritud piirkonnas (Kreeka) esinevate ööpäevakeskmiste välisõhu temperatuuridega, mis on oluliselt kõrgemad kui Eestis, mistõttu katuse sise- ja välispinna vaheline temperatuurigradient ning seega ka soojavoog on seetõttu väiksemad. Vastavalt lisas 1 toodud *Eesti energiaarvutuste testaasta* välisõhu temperatuuridele on need ruumi sisetemperatuurist 5 °C kuni 10 °C madalamad ning seetõttu ongi katusekonstruktsioonis esinev soojavoog valdavalt negatiivne ehk hoonest välja suunatud, sest hoone katuse aluskonstruktsioonis puudub soojustusmaterjali kiht, mis soojusülekannet takistaks. Jooniselt on näha, et võrreldes tavakatusega murukatuse baasvariant vähendab soojavoo ekstreemumeid vältides katuse välispinna kuumenemist päikesepaistelisel päeval ning kütudes isolatsioonikihina päikesepaisteta päeval.



Joonis 3.1. Summaarse päevase soojavoo dünaamika soojustamata tavakatuse ja soojustamata murukatuse baasvariandi lõikes.

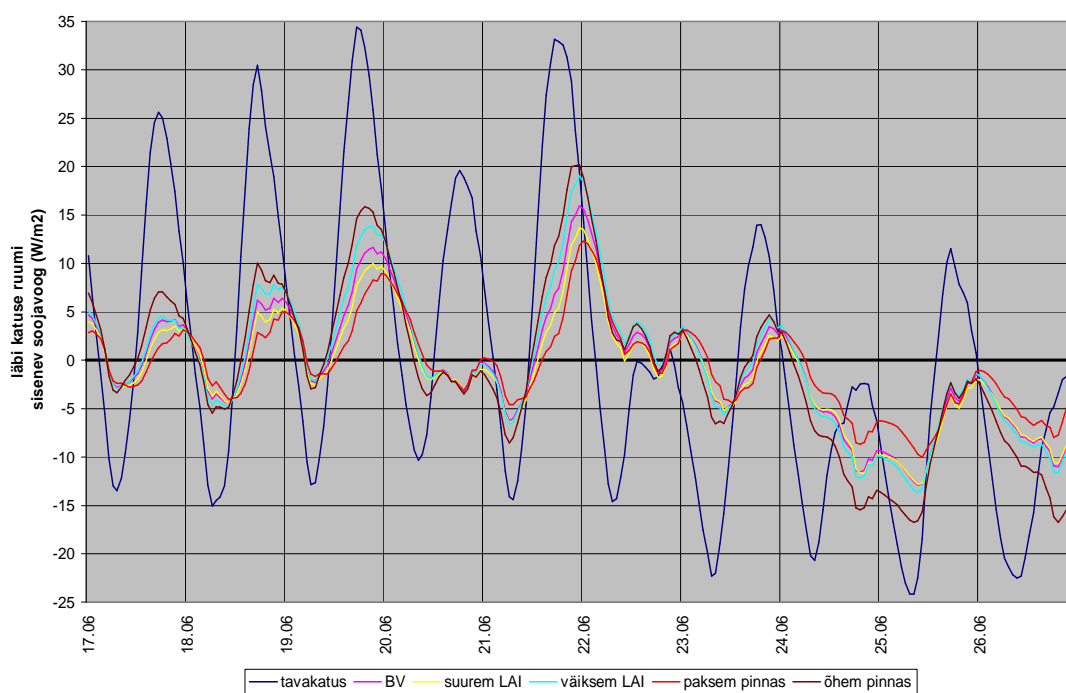
Joonisel 3.3 on esitatud summaarsete päevaste soojavoogude dünaamika erinevate murukatuse variantide lõikes. Jooniselt nähtub, et võrreldes murukatuse baasvariandiga vähendab soojavoo fluktuatsioone kõige vähem õhukese kasvupinnase kihiga murukatus lastes päikesepaistelise päeva jooksul 30 Wh/m² kuni 70 Wh/m² rohkem sooja läbi katuse hoonesse tungida. Baasvariandiga võrreldes paksema kasvupinnasekihiga murukatus vähendas soojavoo dünaamikat kõige enam vähendades soojavoo maksimume 50 Wh/m² kuni 130 Wh/m² võrra. Samuti vähendas soojavoo maksimume taimede tiheduse (väljendatuna taimestiku lehepinnaindeksina) suurenemine. Soojavoogude maksimumid vähenesid lehepinnaindeksi 1-st 3-ni suurenedes 30 Wh/m² kuni 70 Wh/m². Lehepinnaindeksi vähenemine vähendas ka murukatuse võimet positiivseid soojavoogusid vähendada. Ilmnenud tulemus on kooskõlas varasemate uurimistulemustega, mis on näidanud murukatuse kasvupinnase kihi paksuse ning taimestiku lehepinnaindeksi negatiivset korrelatsiooni katust läbiva soojavooga, kuigi erinevus katust läbivate soojavoogude vahel on Kreekas ja Indias läbi viidud uurimuse puhul väiksem ulatudes kasvupinnase paksuse osas 10 – 35 Wh/m² ning lehepinnaindeksi osas 20 – 30 Wh/m² ööpäevas [Theodosiou 2003, Palomo Del Barrio 1998, Kumar and Kaushik 2005].



Joonis 3.3. Summaarse päevase soojavoo dünaamika soojustamata murukatuse erinevate variantide lõikes.

Vaadeldes joonisel 3.3 toodud soojavoogude miinimume on näha, et päikesepaisteta päevade korral lehepinnaindeksi erinevusest tulenev vahe kahaneb praktiliselt olematuks ning erinevus erinevate murukatuse variantide vahel tuleneb kasvupinnase kihi võimest temperatuuride ööpäevast kõikumist ühtlustada.

Soojavoogude ööpäevase dünaamika uurimiseks on joonisel 3.4 esitatud soojavoogude käigud ajavahemikus 17. – 26. juuni. Jooniselt on näha, et tavakatuse soojavoog järgib tugevalt ööpäevast rütmi. Soojustamata aluskonstruktsiooniga katuse puhul on läbi katuse toimuv soojavoog korrapärase ning tugevalt fluktueriva iseloomuga. Päeva jooksul katuse pinna temperatuur päikese otsekiirguse ning tõusva välisõhu temperatuuri mõjul kasvab ning soe tungib läbi katusekonstruktsiooni hoonesse. Pärast päikese loojumist muutub katusepinna kiirgusbilanss negatiivseks ning katus hakkab nii kiirguslikult kui madalama välisõhu temperatuuri mõjul jahtuma. Läbi katuse hoonesse suunatud soojavoog muutub seetõttu negatiivseks ning soe liigub läbi katuse hoonest välja.



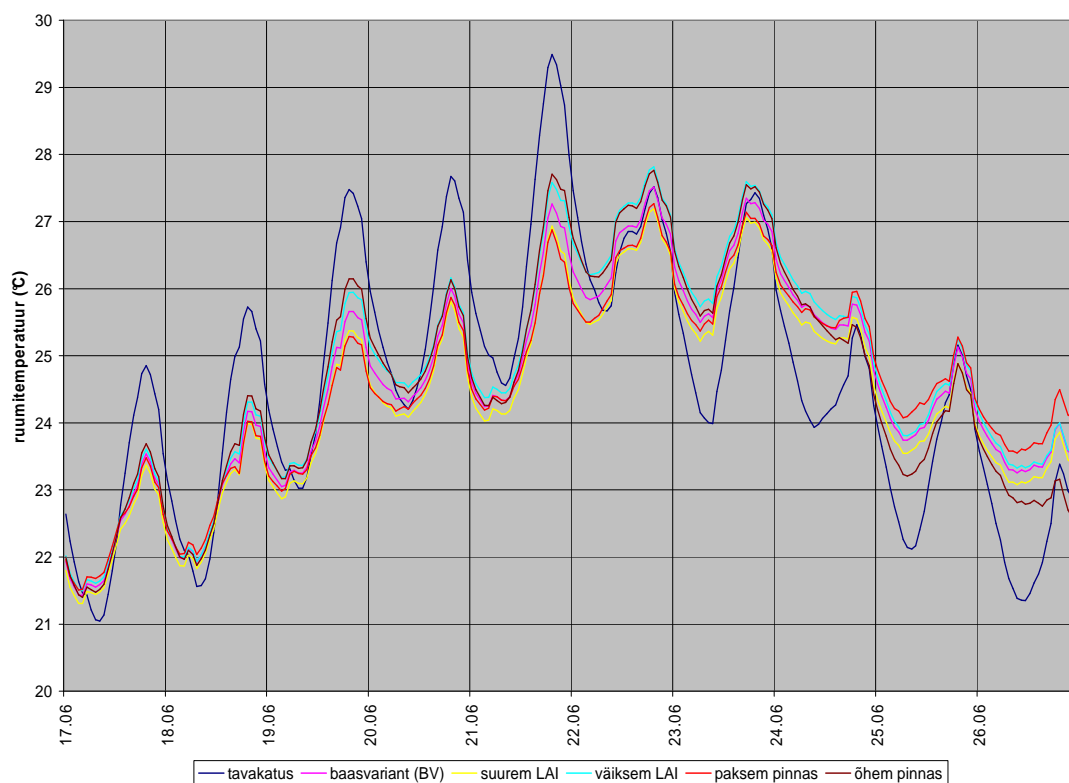
Joonis 3.4. Soojavoo intensiivsus tundide lõikes ajavahemikul 17. kuni 26. juuni soojustamata tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.

Murukatuse erinevad variandid seejuures puhverdavad temperatuuride erinevust ning takistavad taimestiku tõttu katusepinna kiirguslikku jahtumist. Murukatuse kasvupinnase paksuse ning taimestiku tiheduse mõju soojavoo

intensiivsusele on analoogne eelpool kirjeldatule. Jooniselt on näha, et murukatuse erinevad variandid vähendavad oluliselt päevasel ajal läbi katuse toimuvat soojusülekannet, kuid samas pärsvivad ka öist jahtumist.

Joonisel 3.4 on näha, et alates 24. juunist kuni 26. juunini muutuvad soojavood läbi katuse kõigi katusevariantide korral oluliselt negatiivsemaks. *Eesti energiaarvutuste testaasta* andmestiku põhjal vastab samale perioodile madal päikesekiirguse intensiivsus, sademete esinemine 24. ja 26. juunil ning ööpäeva keskmise välisõhutemperatuuri vähenemine keskmiselt 13 °C-ni. Jooniselt nähtub, et murukatuse kasvupinnase kihi paksusel on sellistes kiirelt muutuvates tingimustes suur mõju soojavoo intensiivsusele.

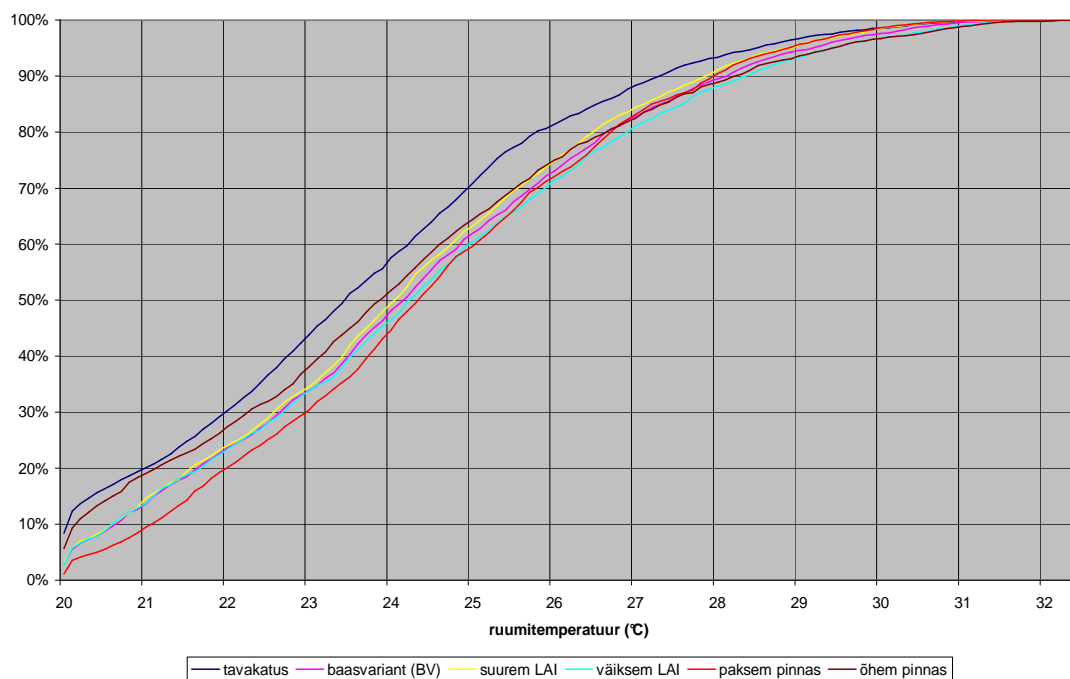
Saamaks aimu läbi katuse toimuva soojavoo mõjust ruumiõhu temperatuurile on joonisel 3.5 esitatud analüüsitud hoone katusekorruse ruumitemperatuuride käik samal ajavahemikul (17. juunist 26. juunini).



Joonis 3.5. Ruumiõhu temperatuuride käigud tundide lõikes uuritava hoone katusekorrusel ajavahemikul 17. kuni 26. juuni soojustamata tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.

Joonisel 3.5 on näha, et soojustamata tavakatuse korral on ruumiõhu temperatuuride käik suurema diapasoonega kui soojustamata aluskonstruksiooniga murukatuse korral. Tavakatuse korral kõigub ruumiõhu temperatuur vaadeldud ajavahemikul 21,0 °C ja 29,5 °C vahemikus. Murukatuse puhul on see vahemik veidi kitsam ulatudes 21,3 °C-st kuni 27,7 °C-ni. Murukatus aitab seega vähendada ruumitemperatuuride maksimume kuni 1,8 °C. Samas pärsib murukatus ruumide jahtumist öisel ajal ning madalama välistemperatuuridega perioodidel, mil tavakatus on võimeline ruume märksa rohkem jahutama. Vastavalt lisas 3 toodud analoogsetele ruumiõhu temperatuuri graafikutele kogu juuni, juuli ja augusti kohta on näha, et soojuse akumulatsiooni tõttu murukatuse kasvupinnases püsivad pärast pikemat kuumaperioodi katusealustes ruumides oluliselt kõrgemad õhutemperatuurid kui tavakatuse korral. Seega hoolimata murukatuse võimest ruumiõhu temperatuuri ekstreemumeid alandada tõstab murukatuse rakendamine üllatuslikult ruumiõhu keskmist temperatuuri ja seega ka potentsiaalset jahutusvajadust.

Ruumiõhu temperatuuride kumulatiivne sagedusjaotus kogu suveperioodi kohta on esitatud joonisel 3.6. Joonisel on selgelt näha, et soojustamata tavakatuse puhul on temperatuur kogu suveperioodi kokkuvõttes 0,5 °C kuni 1,0 °C madalam kui soojustamata murukatuse erinevate variantide korral.



Joonis 3.6. Ruumiõhu temperatuuride kumulatiivne sagedusjaotus kogu suveperioodil soojustamata tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.

Täpsema jahutusvajaduste erinevuse määramiseks arvutati soojustamata tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide kohta piirtemperatuure 25 °C ja 30 °C ületavate kraadtundide hulk. Tabelis 3.1 toodud kraadtundide põhjal nähtub, et jahutusvajadus murukatusega hoones on oluliselt suurem kui tavakatusega hoones kasvades enim väikese taimestiku tihedusega murukatuse korral (erinevus tavakatusega on enam kui 60 %). Teiste murukatuse variantide puhul on erinevus keskmiselt 40 %.

Tabel 3.1. piirtemperatuure ületavate kraadtundide arv soojustamata tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide lõikes.

	tavakatus	baasvariant	suurem LAI	väiksem LAI	paksem pinnas	õhem pinnas
kraadtunnid üle 25 °C	1215	1783	1616	1979	1761	1795
kraadtunnid üle 30 °C	20	32	16	55	14	62

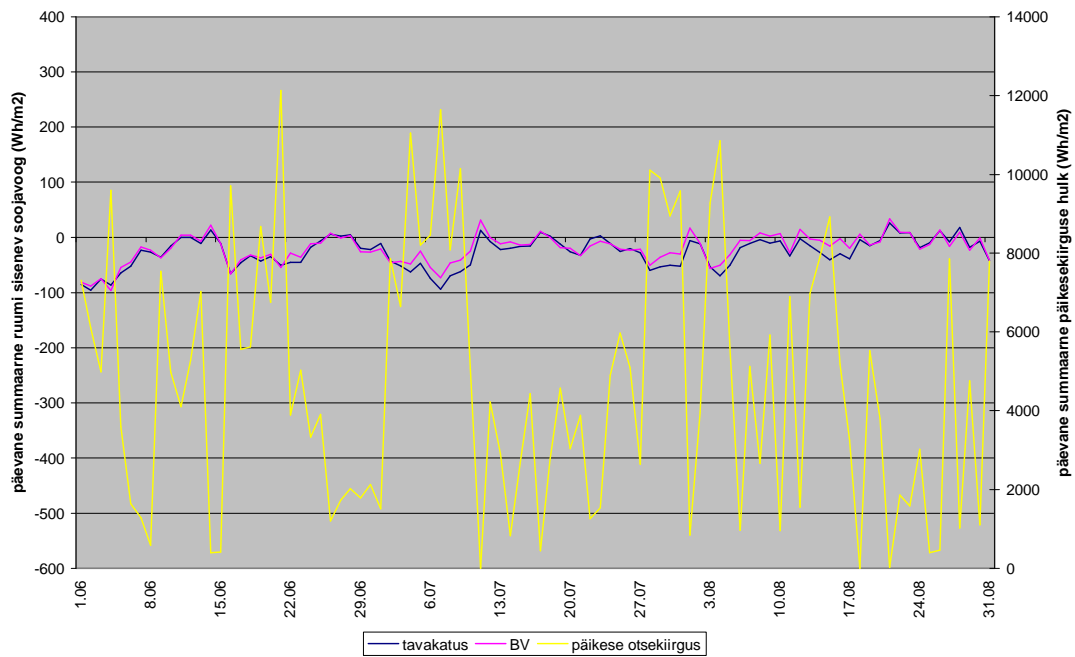
Ruumiõhu temperatuuride analüüsi käigus selgunud tulemused ei ühti varasemate uuringutega, kus murukatuse rakendamisel on täheldatud vastupidist efekti – summaarse jahutusvajaduse vähenemist ja keskmise ruumiõhu temperatuuri alanemist. Tõenäoline põhjus, mis tingib erinevuse varasemate tööde ja käesoleva töö tulemuste vahel on tõenäoliselt kliimaatiline erinevus õhutemperatuuride dünaamikas. Varasemad uuringud, milles on mõõdetud ruumiõhu temperatuuride muutumist sõltuvalt murukatuse rakendamisest on eranditult läbi viidud soojema kliimaga piirkondades, kus ööpäeva keskmine õhutemperatuur on kõrgem kui Eestis. Seetõttu on neis piirkondades öisest jahtumisest tingitud soojavood oluliselt väiksemad ning omavad murukatuse jahutusvõime seisukohast vähemolulist rolli. Käesoleva töö tulemuste põhjal võib järeldada, et Eesti kliimatingimustes, kus välisõhu temperatuur ka suvekuudel on tihti ligi 10 °C madalam ruumiõhu temperatuurist, omab öine jahtumine olulist rolli ruumiõhu temperatuuri alanemisel. Kui murukatuse rajamisega suurendatakse esmalt katusekonstruktsiooni soojapidavust (kerghuumuspõhine kasvupinnasekiht käitub soojusisolaatorina) ning teisalt vähendab päeva jooksul kasvupinnasesse akumulunud soojust temperatuurigradienti katuse sise- ja välispinna vahel, siis on öine jahtumine võrreldes tavakatusega tugevalt pärsitud. Selle tagajärjel inimeste ja seadmete soojaeraldusest, akendest sisenevast päikesekiirgusest jms teguritest tingitud palavus ei jõua öö jooksul ruumidest väljuda

ning hakkab kumuleeruma, mis toob kaasa jahutusvajaduse kasvu. Üks varem Eestis läbi viidud uurimistö on näidanud, et suveperioodil on hommikuti kasvupinnase kihi sees 10 cm sügavusel valitsev temperatuur ca 6 °C kõrgem kui murukatuse välispinnal, mis osaliselt kinnitab, et murukatus vähendab oluliselt katuse õist jahtumist [Teemusk 2005]. Samas on samade uurijate poolt läbiviidud katsete puhul täheldatud uuritavas hoones konditsioneerimisvajaduse mõningast vähenemist seoses murukatuse rakendamisega [Teemusk and Mander 2008]. Üks võimalik põhjus, miks käesoleva uurimustöö ning nimetatud uurimistö tulemused erinevad, võib olla analüüsitud hoonete erinev ventileerimismäär. Toodud uurimuses uurimisobjektiks olnud trükikoja ventilatsioonimäär ei ole uurimuses kirjeldatud, kuid lähtuvalt Vabariigi Valitsuse määruse *Energiatõhususe miinimumnõuded* lisas toodud arvestuslik ventilatsiooni õhuvooluhulk kopeerimis- ja trükkimisruumidele on 4 l/s*m² põrandapinna kohta. Käesolevas töös uuritud eluhoones on projektikohane ventilatsiooni väljatõmbe määr 0,12 l/s*m² põrandapinna kohta, mis on eelpool nimetatust enam kui 30 korda madalam. Trükikodade suur ventilatsioonivajadus võib kaasa tuua olukorra, kus ruumide öine jahtumine toimub hoopis läbi õhuvahetuse ning läbi katuse toimuv jahtumine ei oma enam nii suurt tähtsust. Kuna murukatus on võimeline ruumiõhu temperatuuride päevaseid maksimume alandama, siis suurte ventilatsioonimahtude korral võib murukatus kokkuvõttes jahutusvajadust ikkagi vähendada.

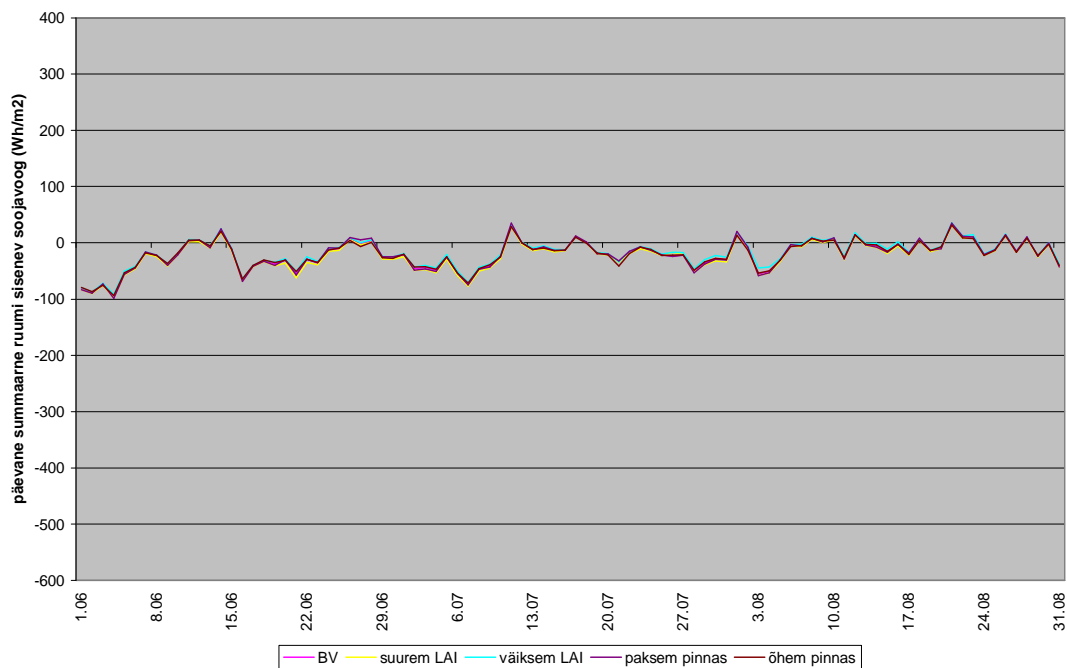
3.2. Katuse soojustatud vastavalt Eesti ehitusnormides toodud miinimumile

Joonisel 3.6 on esitatud summaarsete päevaste soojavoogude dünaamika minimaalselt soojustatud tavakatuse ja vastava murukatuse baasvariandi lõikes. Jooniselt on näha, et läbi katuse hoonesse tungiv soojavoog on päevade lõikes veidi varieeruv, kuid erinevalt soojustamata katusest ei järgi soojavoog päikesekiirguse intensiivsuse dünaamikat. Soojustamata katusega võrreldes on kordi väiksem ka läbi katuse kulgev soojavoog ulatudes alates 34 Wh/m² kuni -100 Wh/m².

Summaarsete päevaste soojavoogude dünaamika minimaalselt soojustatud murukatuse erinevate variantide lõikes on toodud joonisel 3.7. Võrreldes soojustamata katusega on erinevus erineva taimestiku tiheduse ja kasvupinnasekihi paksusega murukatuste vahel praktiliselt olematu jäädes vahemikku 3 Wh/m² kuni 14 Wh/m².



Joonis 3.6. Summaarse päevase soojavoo dünaamika minimaalselt soojustatud tavakatuse ja vastava murukatuse baasvariandi lõikes.



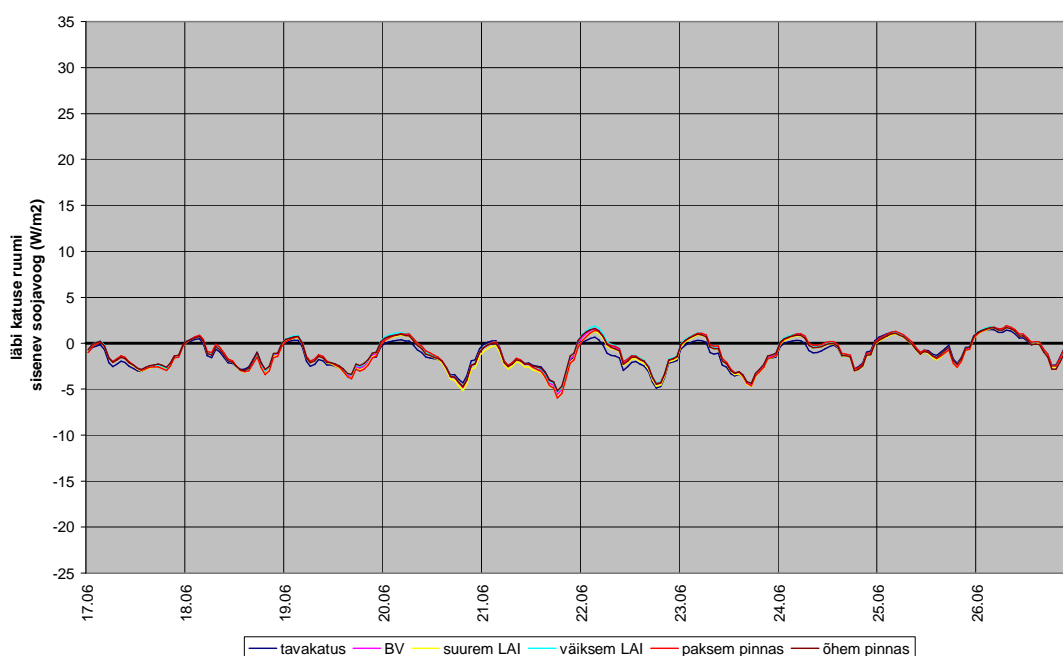
Joonis 3.7. Summaarse päevase soojavoo dünaamika minimaalselt soojustatud murukatuse erinevate variantide lõikes.

Analoogselt puudub oluline erinevus ka minimaalselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide ööpäevase soojavoo dünaamika puhul (joonis 3.8). Jooniselt on näha, et erinevad murukatuse variandid ning ka tavakatus järgivad

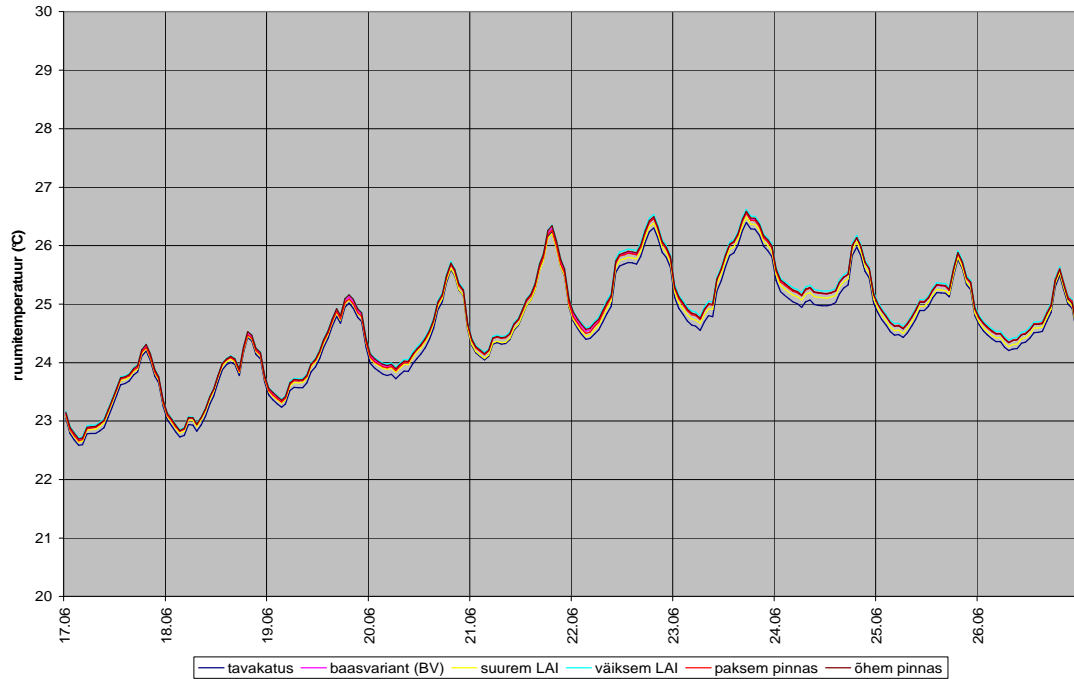
ühtmoodi ööpäevast mustrit. Seejuures on läbi katuse ruumi tungiv soojavoog valdaval osal ajast negatiivne ehk soojavoog on suunatud ruumist välja.

Minimaalselt soojustatud katuse korral katusekorruse ruumides tekkiva õhutemperatuuri käigid on esitatud joonisel 3.9. Temperatuuride kõikumine joonisel kujutatud ajavahemikul jääb vahemikku 22,6 °C kuni 26,6 °C. Võrreldes soojustamata katusega on temperatuurikäikude diapason 4 °C kitsam, mis tähendab, et ekstreemselt kõrgeid temperatuure esineb harvemini. Võrreldes tavakatuse ja murukatuse erinevate variantide temperatuuride dünaamikat puudub neil oluline erinevus. Kui vaadelda vastavate temperatuuride dünaamikat kogu suveperioodi vältel (toodud lisas 3), siis võib kuumaperioodidel täheldada tavakatuse puhul kuni 0,3 °C madalamaid temperatuure päevaste maksimumide osas.

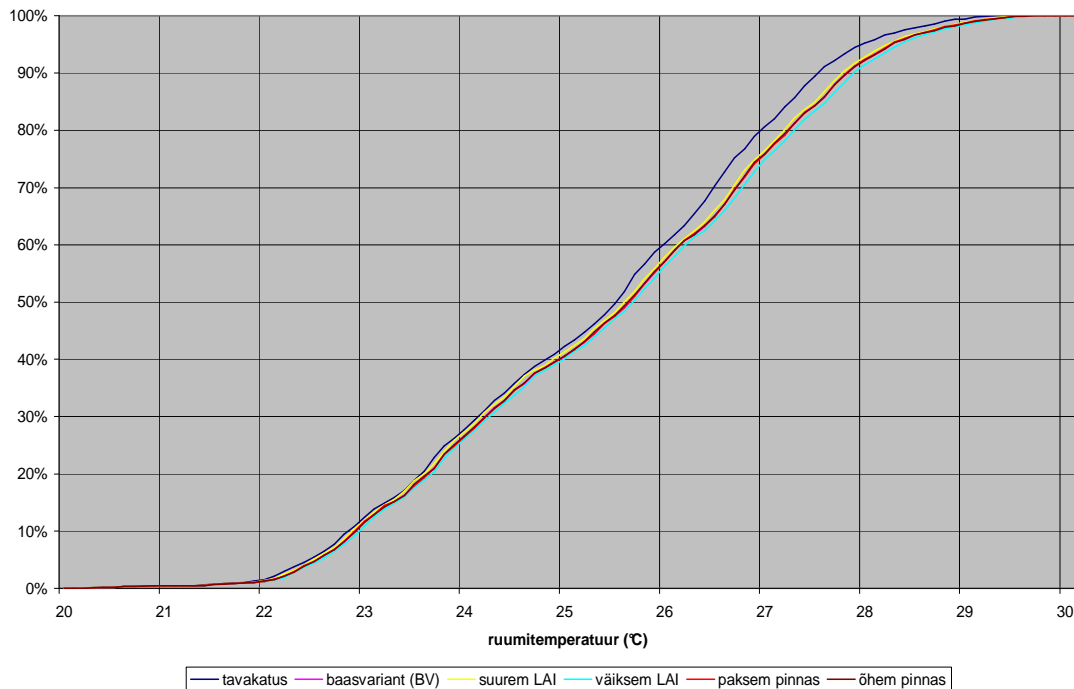
Sama tulemuse võib välja lugeda jooniselt 3.10, millel on kujutatud ruumitemperatuuride kumulatiivset sagedusjaotust kogu suveperioodi kohta. Muidu murukatuste erinevate variantidega ühtlaselt kasvav tavakatuse kumulatiivse sagedusjaotuse kõver näitab ruumitemperatuuri 27 °C kuni 28 °C ümbruses ligikaudu 0,3 °C nihet madalamate temperatuuride poole.



Joonis 3.8. Soojavoo intensiivsus tundide lõikes ajavahemikul 17. kuni 26. juuni minimaalselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.



Joonis 3.9. Ruumiõhu temperatuuride käigud tundide lõikes uuritava hoone katusekorrusel ajavahemikul 17. kuni 26. juuni minimaalselt soojustatud tavakatus ja vastavate murukatuse variantide puhul.



Joonis 3.10. Ruumiõhu temperatuuride kumulatiivne sagedusjaotus kogu suveperioodil minimaalselt soojustatud tavakatus ja vastavate murukatuse variantide puhul.

Detailse jahutusvajaduse erinevuse määramiseks arvutati minimaalselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide kohta piirtemperatuure 25 °C ja 30 °C ületavate kraadtundide hulk. Tabelis 3.2 toodud kraadtundide põhjal nähtub, et jahutusvajadus murukatusega hoones on mõnevõrra suurem kui tavakatusega hoones olles suurim väikese taimestiku tihedusega murukatuse korral (erinevus tavakatusega on ca 18 %) ning väiksem tihedama taimestikuga murukatuse korral (erinevus tavakatusega ca 11 %). Teiste murukatuse variantide puhul on erinevus keskmiselt 14 %.

Tabel 3.2. piirtemperatuure ületavate kraadtundide arv minimaalselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide lõikes.

	tavakatus	baasvariant	suurem LAI	väiksem LAI	paksem pinnas	õhem pinnas
kraadtunnid üle 25 °C	2048	2336	2278	2411	2335	2334
kraadtunnid üle 30 °C	0	0	0	0	0	0

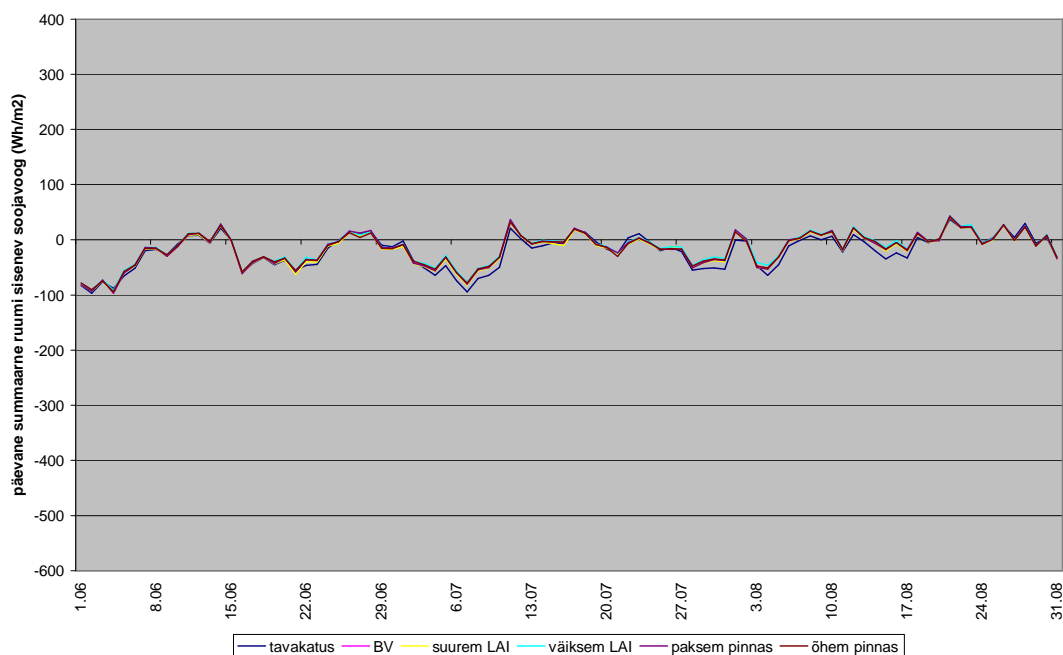
Võrreldes soojustamata katusega on 25 °C piirtemperatuuri ületavate kraadtundide arv soojustuskihi lisamisel suurenenud keskmiselt 500 kuni 600 kraadtunni võrra, mis kinnitab eelnevas peatükis välja pakutud teooriat, et jahutusvajadus sõltub eelkõige katuse öisest jahtumisest.

Katust läbivate soojavoogude oluline vähenemine soojustusmaterjali lisamisel on kooskõlas varasemate uuringutega [Theodosiou 2003]. Kreekas läbi viidud uurimus näitas, et 15 cm paksuse soojustuskihiga murukatuse aluskonstruktsiooni korral oli murukatuse mõju jahutusvajaduse vähenemisele olematu [Niachou *et al.* 2001].

3.3. Katuse soojustatud vastavalt hoone projektile (vastab Vabariigi Valitsuse määruse *Energiatõhususe miinimumnõuded soovituslikule tasemele*)

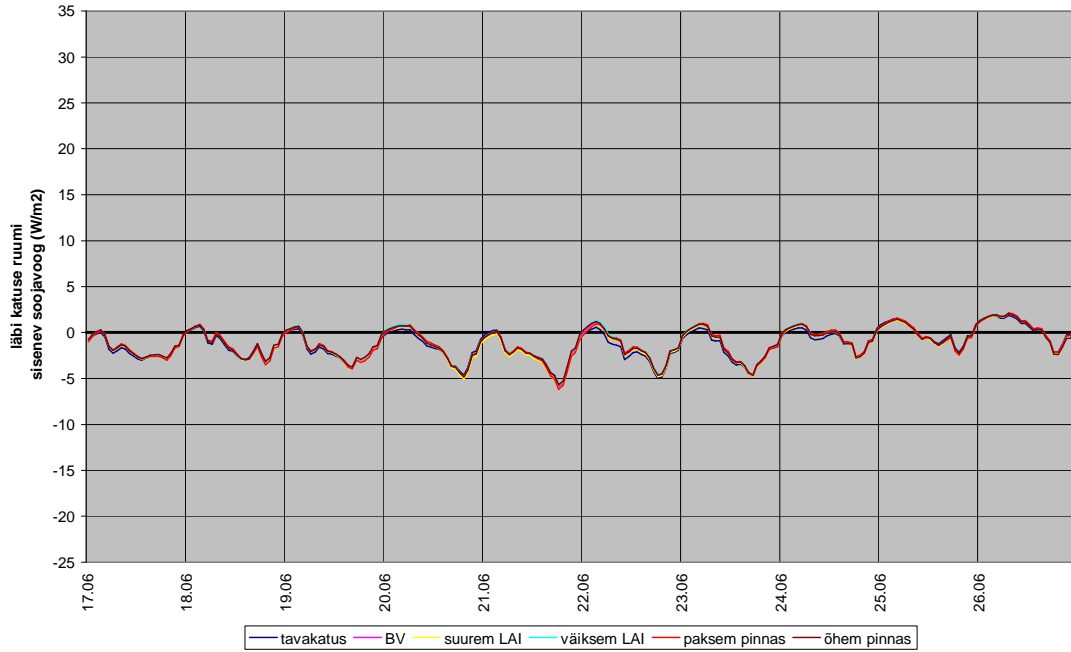
Käesoleva uurimustöö raames analüüsitud hoone projektikohane soojustus sisaldab võrreldes eelmises peatükis kirjeldatud minimaalselt soojustatud katusega 8 cm enam soojustusmaterjali. Analoogselt eelmises peatükis tooduga ei järgi läbi katuse toimuv soojavoog päikesekiirguse intensiivsuse dünaamikat. Ka joonisel 3.11

esitatud läbi katuse kulgev soojavoog on analoogne eelmises peatükis analüüsitud minimaalselt soojustatud katusega varieerudes vahemikus 36 Wh/m² kuni -97 Wh/m².

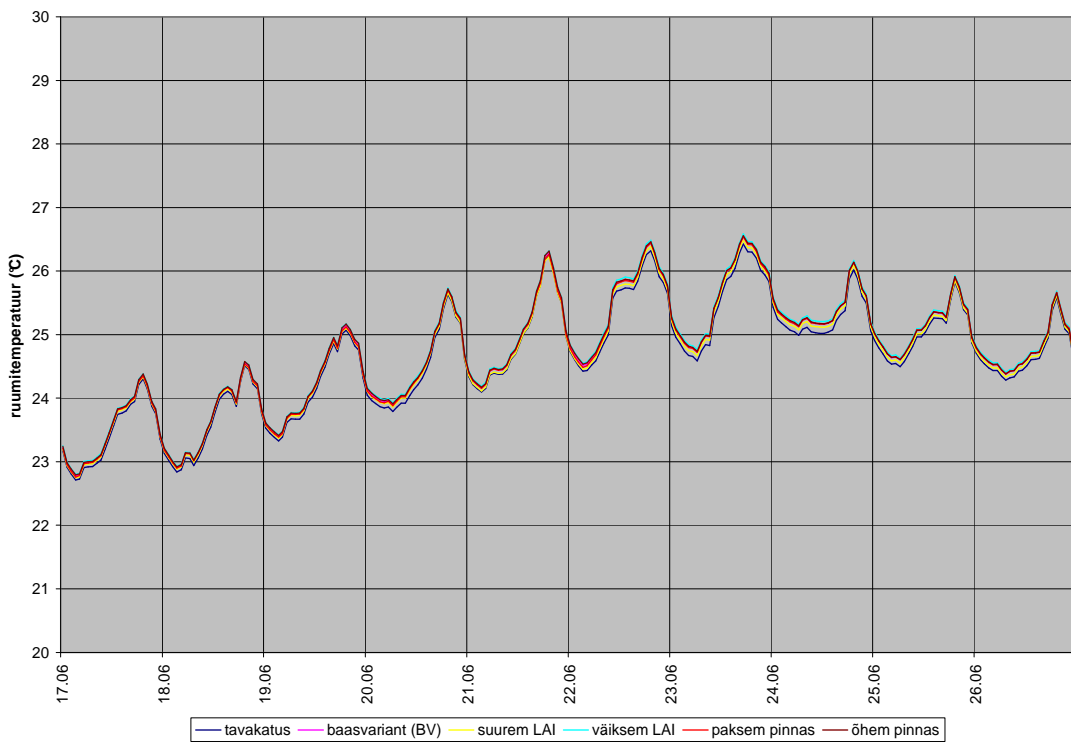


Joonis 3.11. Summaarsete päevaste soojavoogude dünaamika projektikohaselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide lõikes.

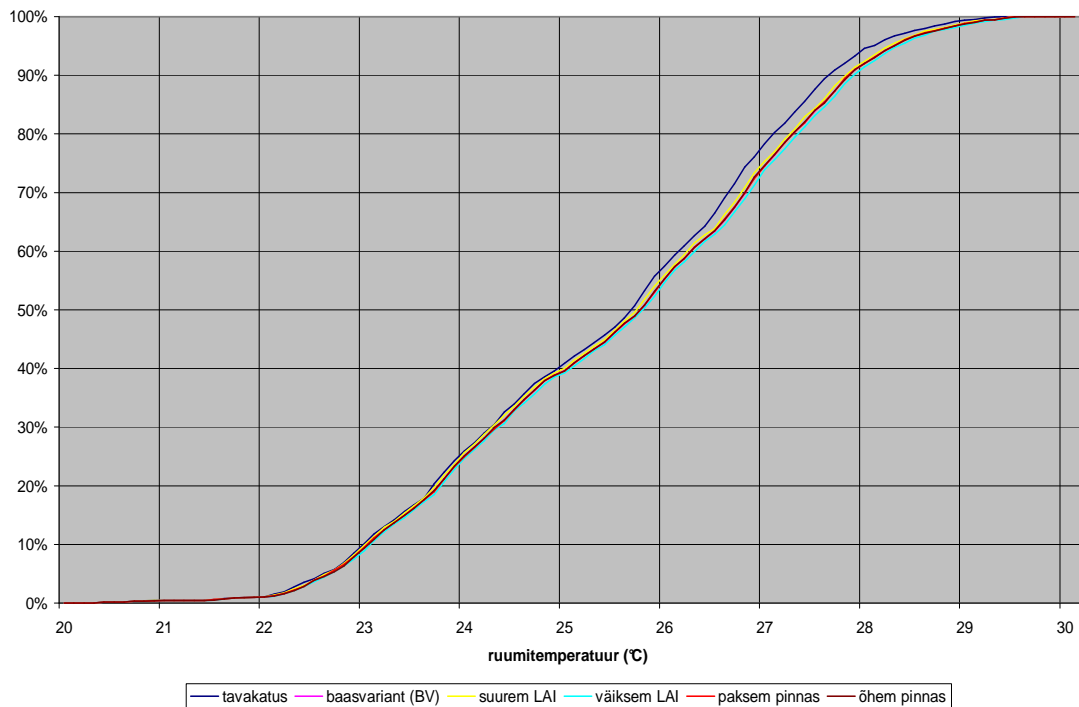
Oluline erinevus eelmises peatükis kirjeldatud minimaalselt soojustatud katusega võrreldes puudub ka soojavoogude ööpäevase dünaamika ning ruumiõhu temperatuuride ööpäevase dünaamika osas. Soojavoogude ööpäevane dünaamika ajavahemiku 17. juuni kuni 26. juuni kohta on esitatud joonisel 3.12. Ruumiõhu temperatuuride ööpäevane dünaamika ajavahemiku 17. juuni kuni 26. juuni kohta on esitatud joonisel 3.13. Ruumiõhu temperatuuride ööpäevane dünaamika kogu suveperioodi kohta on esitatud lisas 3. Ruumi õhutemperatuuri käik joonisel 3.12 kujutatud ajavahemikul jääb vahemikku 22,7 °C kuni 26,5 °C. Võrreldes soojustamata katusega on temperatuurikäikude diapason ca 4 °C kitsam, mis tähendab, et ekstreemselt kõrgeid temperatuure esineb harvemini. Võrreldes tavakatuse ja murukatuse erinevate variantide temperatuuride dünaamikat puudub neil oluline erinevus. Kui vaadelda vastavate temperatuuride dünaamikat kogu suveperioodi vältel, siis võib kuumaperioodidel täheldada tavakatuse puhul kuni 0,3 °C madalamaid temperatuure päevaste maksimumide osas. Sama kinnitab ka joonisel 3.14. kujutatud ruumiõhu temperatuuride kumulatiivne sagedusjaotus.



Joonis 3.12. Soojavoo intensiivsus tundide lõikes ajavahemikul 17. kuni 26. juuni projektikohaselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.



Joonis 3.13. Ruumiõhu temperatuuride käigid tundide lõikes uuritava hoone katusekorrusel ajavahemikul 17. kuni 26. juuni projektikohaselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.



Joonis 3.14. Ruumiõhu temperatuuride kumulatiivne sagedusjaotus kogu suveperioodil projektikohaselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.

Detailse jahutusvajaduse erinevuse määramiseks arvutati minimaalselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide kohta piirtemperatuure 25 °C ja 30 °C ületavate kraadtundide hulk. Tabelis 3.3 toodud kraadtundide põhjal nähtub, et jahutusvajadus murukatusega hoones on mõnevõrra suurem kui tavakatusega hoones olles suurim väikese taimestiku tihedusega murukatuse korral (erinevus tavakatusega on ca 12 %) ning väiksem tihedama taimestikuga murukatuse korral (erinevus tavakatusega ca 7 %). Teiste murukatuse variantide puhul on erinevus keskmiselt 9 %.

Tabel 3.3. Piirtemperatuure ületavate kraadtundide arv projektikohaselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide lõikes.

	tavakatus	baasvariant	suurem LAI	väiksem LAI	paksem pinnas	õhem pinnas
kraadtunnid üle 25 °C	2216	2421	2373	2476	2419	2420
kraadtunnid üle 30 °C	0	0	0	0	0	0

Võrreldes minimaalselt soojustatud katusega on 25 °C piirtemperatuuri ületavate kraadtundide arv täiendava soojustuskihi lisamisel suurenenud keskmiselt

80 kuni 90 kraadtunni võrra, mis kinnitab eelnevates peatükkides välja pakutud teooriat, et jahutusvajadus sõltub eelkõige katuse öisest jahtumisest.

4. Kokkuvõte

Käesolev uurimustöö tegeles ekstensiivse murukatuse jahutusvõime analüüsiga. Töö eesmärk oli teoreetiliselt uurida murukatuse jahutavat toimet Eesti kliimas rakendades selleks murukatuse matemaatilist modelleerimist. Eesti kliimaandmestiku ning murukatuse matemaatilise mudeli alusel analüüsiti dünaamilise hoonesimulatsiooni abil läbi katuse hoonesse sisenevaid soojavoogusid ning kalkuleeriti murukatuse mõju hoone jahutusvajadusele.

Töö täpsemaks eesmärgiks oli arvutada ning võrdlevalt analüüsida soojavoogusid, mis läbi bituumenkattega tavakatuse ning murukatuse hoonesse tungivad kasutades selleks dünaamilise hoonesimulatsiooni vahendeid, Eesti kliimaandmestikku ning reaalse hoone mudelit varieerides katuse aluskonstruktsioonide soojustusmaterjali kihi paksust soovituslikust normist kuni soojustuse täieliku puudumiseni. Samuti varieeriti olulise mõjuga murukatuse parameetreid nagu taimestiku tihedus ning kasvupinnase kihi paksus. Paralleelselt soojavoogudega oli töö eesmärgiks veel arvutada analüüsitava hoone katusealuste ruumide temperatuurikäigud ning arvutada nende põhjal esmalt hoone jahutusvajadus ning seejärel hinnata murukatuse mõju hoone jahutusvajadusele.

Töö teoreetilises osas anti ülevaade varasematest uurimustöödest, mis selles valdkonnas on tehtud, kirjeldati murukatuses toimuvaid protsesse ning neid mõjutavaid tegureid. Lühidalt kirjeldati hoonete energiatarbimist Eestis ning kirjeldati töö praktilises osas kasutatavaid dünaamilise hoonesimulatsiooni vahendeid ja lähteandmeid.

Töö praktilises osas koostati Tartus Näituse 22 asuva reaalse eluhoone matemaatiline mudel koos detailse sisekasutuse ning tehnosüsteemide töö kirjeldusega kasutades algmaterjalidena hoone projektdokumentatsiooni. Hoone mudel loodi dünaamilise hoonesimulatsiooni programmi EnergyPlus keskkonnas. Hoonemudelist loodi 18 valdavas osas identset varianti, mille puhul varieeriti soojustuskihi paksust katuse aluskonstruktsioonis (0 – 23 cm), murukatuse kasvupinnase paksust (5 – 15 cm) ning murukatust katva taimestiku tihedust (LAI 1 - 3). Dünaamilise hoonesimulatsiooni läbiviimiseks valiti Eesti pikaajalist keskmist kliimat iseloomustav kliimaandmestik ning täiendati seda EMHI andmetega puuduolevate parameetrite osas.

Analüüsi käigus selgus, et soojustamata katust läbivate soojavoogude dünaamika on ajas väga varieeruv ning ööpäeva keskmisena tugevalt negatiivne, mis tähendab, et hoone jahtub läbi katuse. Kuigi murukatus vähendas päikesepaistega päevadel läbi katuse ruumidesse tungivat soojavoogu pärssis murukatuse kasvupinnases akumulatsioon soojus ning murukatuse kasvupinnase ning taimestiku kihi isoleeriv mõju katuse öist jahtumist, mistõttu palavus hakkas hoones kumuleeruma ja kokkuvõttes hoone jahutusvajadus hoopis suurenes. 25 °C piirtemperatuuri ületavate kraadtundide põhjal suurenes jahutusvajadus murukatusel 40 % kuni 60 %.

Arvutustulemused minimaalse ning soovitusliku soojustuskihi lõikes tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide vahel olid üksteisele väga sarnased. Soojustuskiht vähendas drastiliselt läbi katuse tungivat soojavoogu ning murukatuse mõju hoone jahutusvajadusele kahanes seetõttu samuti. Sarnaselt soojustamata katusega suurendas murukatuse kasutamine hoone katusekonstruktsiooni soojapidavust ning soojuse akumulatsioonivõimet, mistõttu hoone öine jahtumine oli võrreldes tavakatusega pärsitud. Seetõttu suurendas murukatuse rakendamine hoone arvutuslikku jahutusvajadust, kuid soojustuskihist tulenevalt vähem kui soojustamata katuse puhul. Arvuliselt suurenes soojustatud katuse puhul murukatuse rajamisel hoone jahutusvajadus 7 % kuni 14 % sõltuvalt murukatuse omadustest ning soojustuskihi paksusest katusekonstruktsioonis.

Uurimustöös leitud tulemused näitavad, et Eesti kliimas on erinevalt Kreeka, Jaapani, Hiina ja India kliimast ruumide jahutamisel olulise mõjuga protsess katusepinna öine jahtumine, mis on tingitud suhteliselt madalast ööpäeva keskmisest välisõhu temperatuurist. Kõik lahendused, mis öist jahtumist pärsivad suurendavad vastavalt ka hoone jahutusvajadust. Kui ruumide öises jahtumises mängivad põhirolli teised protsessid nagu suuremahuline öine ventileerimine (mis viib ruumi kogunenud soojuse ruumist välja kiiremini, kui läbi katuse toimuv soojusülekanne) vms, siis soojustamata katuste puhul võib murukatus ruumide jahutusvajadust kokkuvõttes vähendada, kuna on võimeline ruumiõhu temperatuuri päevaseid maksimume mõnevõrra alandama. Samas on valdav osa hooneid Eestis soojustatud vastavuses vähemalt normatiivsele miinimumile, mis minimeerib murukatuse võimet päevaseid ruumiõhu temperatuuride maksimume alandada. Seega ei ole Eesti kliimas murukatused üldjuhul võimelised katusealuseid ruume jahutama vaid pigem on

rakendatavad katuse konstruktiivse osa kaitseks ekstreemsete temperatuurikõikumiste eest.

Summary

Cooling potential of lightweight greenroofs in Estonian climate

This paper analyses the cooling potential of light-weight greenroofs. The aim of this study was to investigate the cooling potential of greenroofs through means of numerical modeling and building simulation implementing detailed Estonian climate data. Particular goals were to:

- model the heat fluxes through roof-construction covered with bituminous roofing material compared to covering by greenroof soil and plant canopy with varying soil thickness and plant density. Additionally the insulation thickness in base construction for all roof-types was varied from none to recommended national normatives.
- analyze the indoor air temperature fluctuations of rooms directly beneath the greenroofs and reference roof.
- calculate the effect of greenroof on cooling demand according to the temperature fluctuations in considered rooms.

In theoretical part of this paper a review of previous studies and finding was given, the main processes in greenroofs were described alongside with factors that influence those processes. The energy demand of buildings in Estonia was briefly discussed to give the perspective for understanding the relevance of cooling in total energy consumption. The detailed description of available numerical methods and used dynamic building simulation tools were given alongside with description of detailed input data.

In the practical part of this study a detailed model of real-life 5-storey residential building was constructed based on project documentation. The model was multiplied for sequential case-studies to analyze the effect of different soil thickness, plant density and insulation thickness on room temperatures and cooling demand. The simulation was carried out using EnergyPlus building simulation tool. Weather data for simulation was adapted from Estonian test reference year dataset which was complemented with precipitation data from Estonian Meteorological and Hydrological Institute.

The results of the study showed that for uninsulated roof the heat fluxes through the roof were variational and heavily depended on solar radiation intensity. However the mean circadian heat flux was mainly negative for all roof types indicating that roof contributes to cooling the building. And although different greenroof configurations lowered the positive heat flux throughout the day these functioned as additional insulation layer at night and reduced the night-time cooling of roof surface. The simulation results showed that because of it the heat generated inside the building was accumulating over sequential days when a green roof layers were present and the overall cooling demand increased. The calculated degreehours over 25 °C showed 40 % to 60 % increase in cooling demand when greenroof layers were applied to roof construction instead of bituminous roof cover.

The use of average and recommended normative insulation thicknesses in roof construction greatly diminished the variation and quantity of heat fluxes so the differences in heat fluxes and room temperatures between regular bituminous roof cover and different greenroof variations were very little. As with uninsulated roof the greenroof functioned as additional insulation layer and reduced the night-time cooling accordingly. Due to the insulation material in base construction of analysed roofs the cooling demand increase was relatively small. The calculated degreehours over 25 °C showed 7 % to 14 % increase in cooling demand when greenroof layers were applied to insulated roof construction instead of bituminous roof cover.

The findings in this study show that unlike the previous studies carried out in warmer climates the main role in cooling the building is played by night-time cooling of building enclosure (including roof). All measures (including greenroofs) that decrease the thermal conductivity of roof construction cause the heat accumulation inside the building. However if the night-time cooling is enhanced with huge night-time ventilation volumes, the ability of greenroofs to lower the day-time temperature maximums might reduce the overall cooling demand.

It is important to notice that in Estonia the majority of buildings have relatively thick insulation layer incorporated into the roof construction, which makes the difference between regular bituminous roof covering and greenroofs practically nonexistent. In conclusion the greenroofs do not have a significant cooling potential in Estonian climate. They rather protect the base roof construction from large temperature fluctuations extending its durability.

5. Kasutatud kirjandus

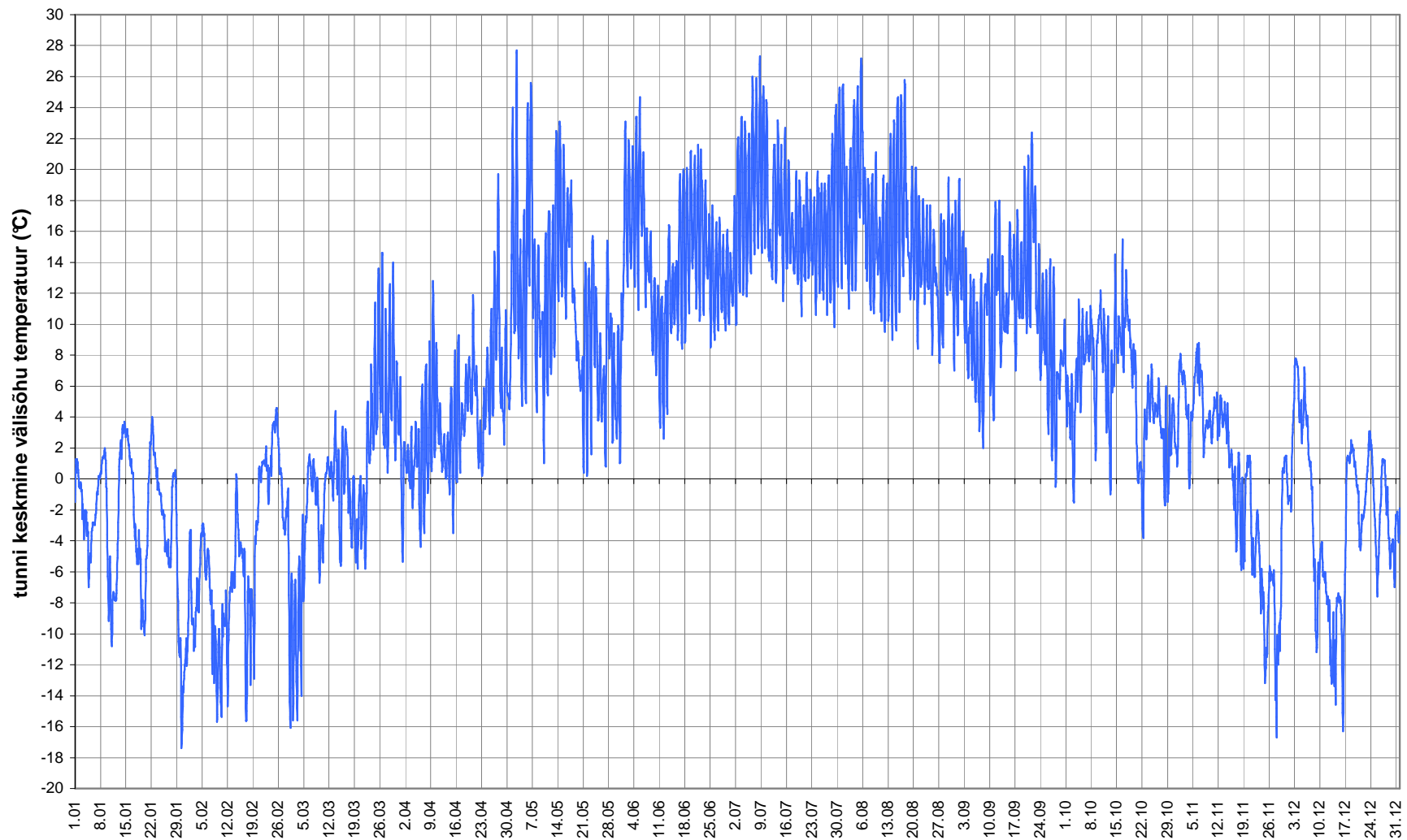
- Alexandri, E. and Jones, P. 2007.** Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. *Building and Environment* 42: 2835–2849.
- Clarke, J. 2001.** *Energy Simulation in Building Design*, Second Edition. Butterworth-Heinemann, A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd, Oxford.
- Dickinson, R.E., Henderson-Sellars, A. and Kennedy, P.J. 1993.** Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model. Climate and Global Dynamics Division of National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, NCAR/TN-387 +STR, 1993.
- EnergyPlus Engineering Reference. 2008.** US Department of Energy. Kättesaadav: <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf> (seisuga 26.05.2008)
- EnergyPlus Input/Output Reference. 2008.** US Department of Energy. Kättesaadav: <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/inputoutputreference.pdf> (seisuga 26.05.2008)
- Fang, C.F. 2008.** Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops. *Energy and Buildings* 40: 1048-1052.
- Frankenstein, S. and Koenig, G. 2004a.** FASST Vegetation Models. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory (ERDC/CRREL), Technical Report TR-04-25, 2004.
- Frankenstein, S. and Koenig, G. 2004b.** Fast all-season soil strength (FASST). U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory (ERDC/CRREL), Special Report SR-04-01, 2004.
- Kalamees, T. and Kurnitski, J. 2006.** Estonian test reference year for energy calculations. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering* 12 (1): 40-58.

- Koorberg, P. 2001.** Ekstensiivse katusehaljastuse loomine ja selle linnaökoloogiline tähendus. Lõputöö maastikukaitse ja –hoolduse erialal. EPMÜ Keskkonnakaitse instituut.
- Kumar, R. and Kaushik, S.C. 2005.** Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment* 40: 1505–1511.
- Liu, K. and Baskaran, B. 2003.** Thermal performance of green roofs through field evaluation. Proceedings for the First North American Green Roof Infrastructure Conference, Awards and Trade Show. Pp. 1-10
- Mentens, J., Raes, D. and Hermy, M. 2003a.** Greenroofs as a part of urban water management. Department of Land Management, KULeuven, Belgium. Kättesaadav: <http://www.agr.kuleuven.ac.be/lbh/lbnl/ecology/pdf-files/pdf-art/jeroen/procWRM2003.pdf> (seisuga 26.05.2008)
- Mentens, J., Raes, D. and Hermy, M. 2003b.** Effect of orientation on the water balance of greenroofs. Department of Land Management, KULeuven, Belgium Kättesaadav: <http://www.agr.kuleuven.ac.be/lbh/lbnl/ecology/pdf-files/pdf-art/jeroen/procgreenroofs.pdf> (seisuga 26.05.2008)
- Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A. and Mihalakakou, G. 2001.** Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings* 2001, 33: 719-729.
- Onmura, S. 2001.** Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens. *Energy and Buildings* 33: 653–66.
- Palomo Del Barrio, E. 1998.** Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings* 27: 179-193.
- Peck, S.W., Callaghan, C., Kuhn, M.E. and Bass, B. 1999.** Greenbacks from green roofs: Forging a new industry in Canada. Status report on benefits, barriers and opportunities for green roof and vertical garden technology diffusion. Leheküljed 13-31. Peck & Associates, Toronto, Canada
- Roofscapes inc. 2002.** Role of Green Roof in Managing Thermal Energy. Kättesaadav: http://www.roofmeadow.com/PDF/Thermal_effects.pdf (seisuga 17.05.04)

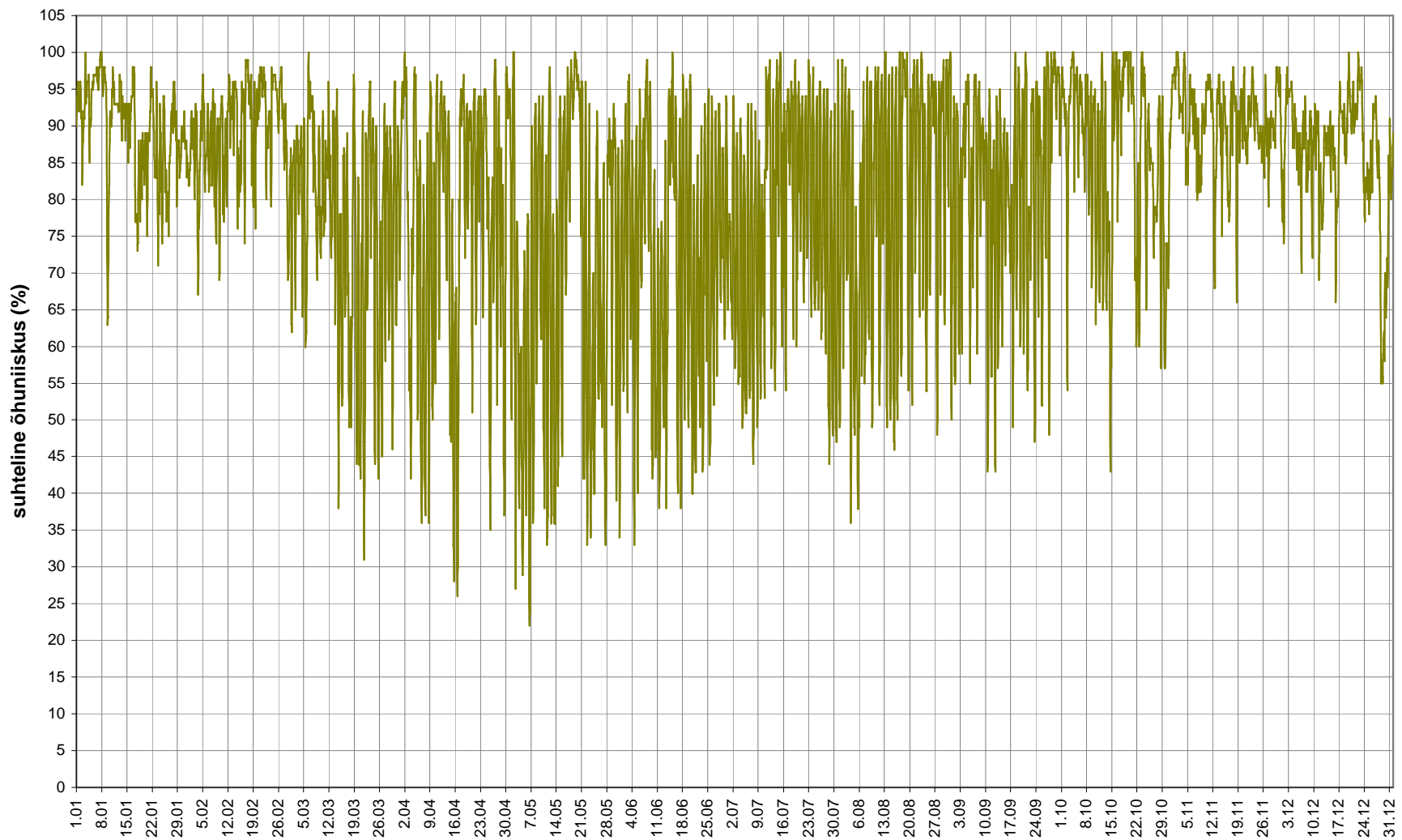
- Sailor, D.J., Hutchinson, D. and Bokovoy, L. 2008.** Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S. *Energy and Buildings* 40: 1246–1251.
- Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., Mihalakakou, G., Synnefa, A., Hatzibiros, A. and Patargias, P. 2007.** Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. *Energy* 32: 1781–1788.
- Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C. and Dalchjer, A. 1986.** A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of Atmospheric Sciences* 43 (1986) 505–531.
- Spala, A., Bagiorgas, H.S., Assimakopoulos, M.N., Kalavrouziotis, J., Matthopoulos, D. and Mihalakakou, G. 2008.** On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. *Renewable Energy* 33: 173-177.
- Takakura, T., Kitade, S. and Goto, E. 2000.** Cooling effect of greenery cover over a building. *Energy and Building* 31: 1-6.
- Teemusk, A. 2005.** Murukatuse temperatuuri reguleerimise ja vee kinnipidamise võime Eesti kliimatingimustes. Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal. TÜ Geograafia instituut.
- Teemusk, A. and Mander, Ü. 2007.** Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events. *Ecological Engineering* 30 (3): 271-277.
- Teemusk, A. and Mander, Ü. 2008.** Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: a case study from Estonia. *Building and Environment*. Accepted.
- Theodosiou, T.G. 2003.** Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy and Buildings* 35: 909-917.
- Wong, N.H., Tan, P.Y. and Chen, Y. 2007.** Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate. *Building and Environment* 42: 25–54.

Wong, N.H., Chen, Y., Ong, C.L. and Siab, A. 2003. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment* 38: 261–270.

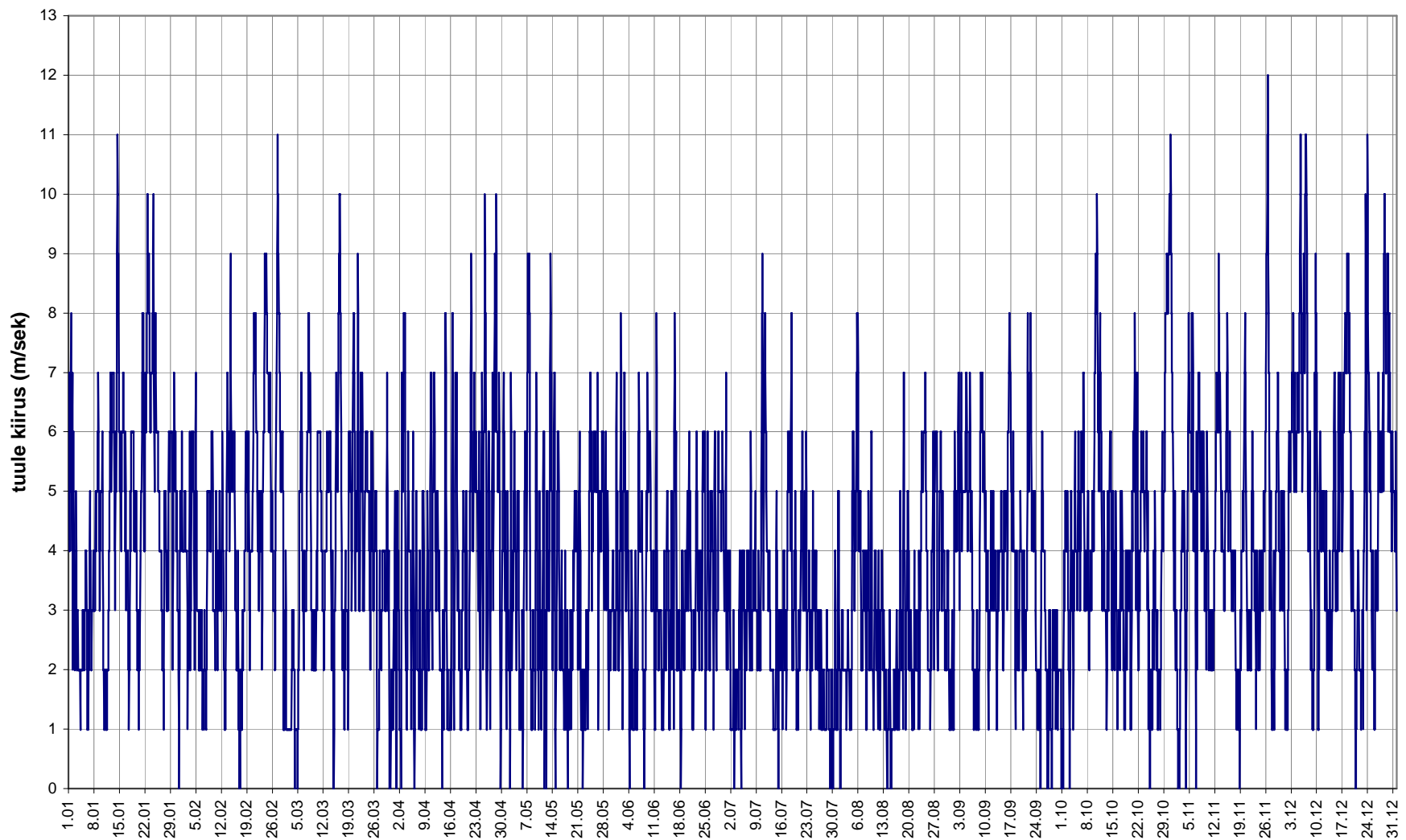
Lisa 1. *Eesti energiaarvutuste testaastas* sisalduvad meteoparameetrid



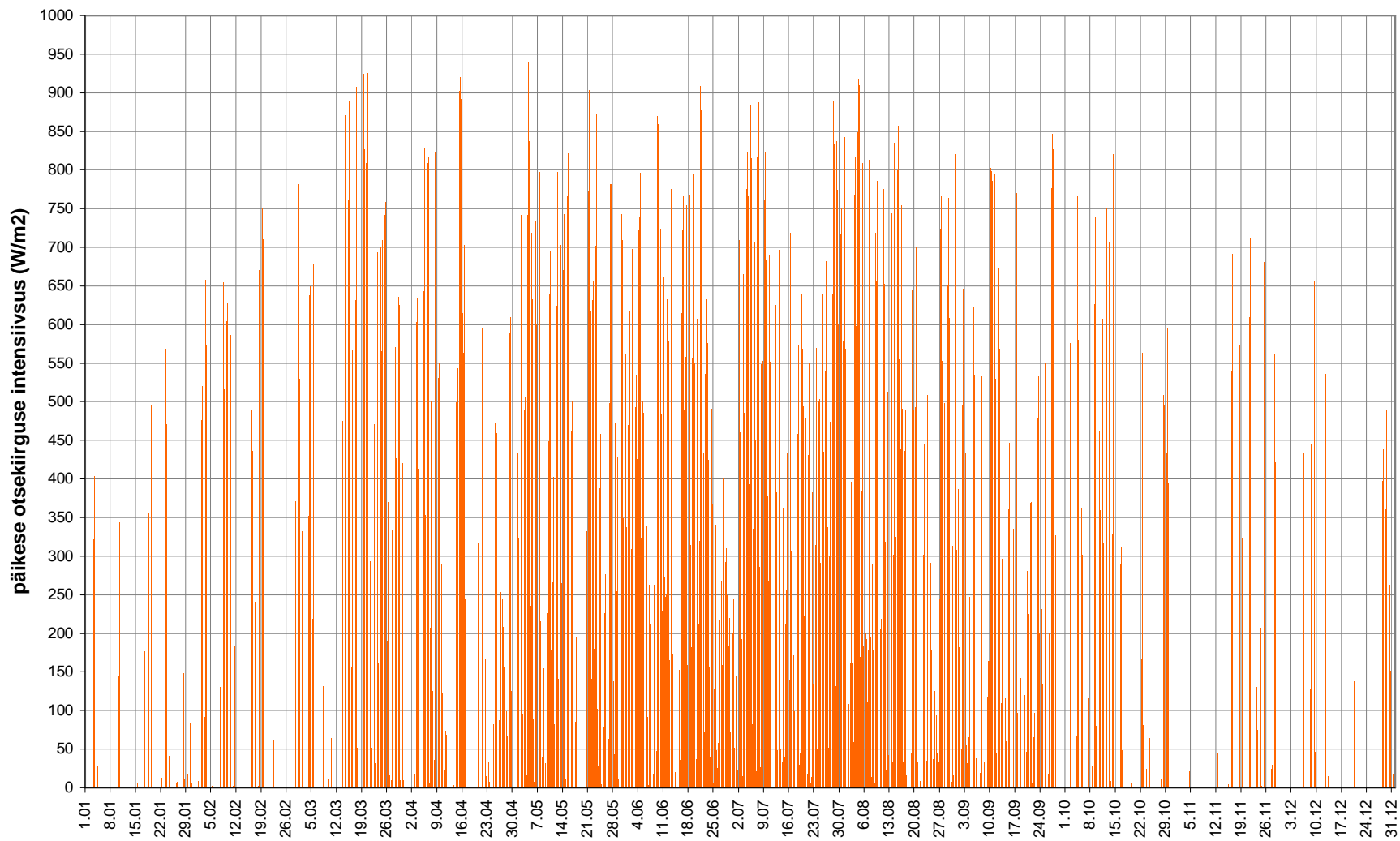
Joonis 1. Välisõhu temperatuuri tunnikeskised andmed vastavalt Eesti energiaarvutuste test aastale [Kalamees and Kurnitski 2006 järgi].



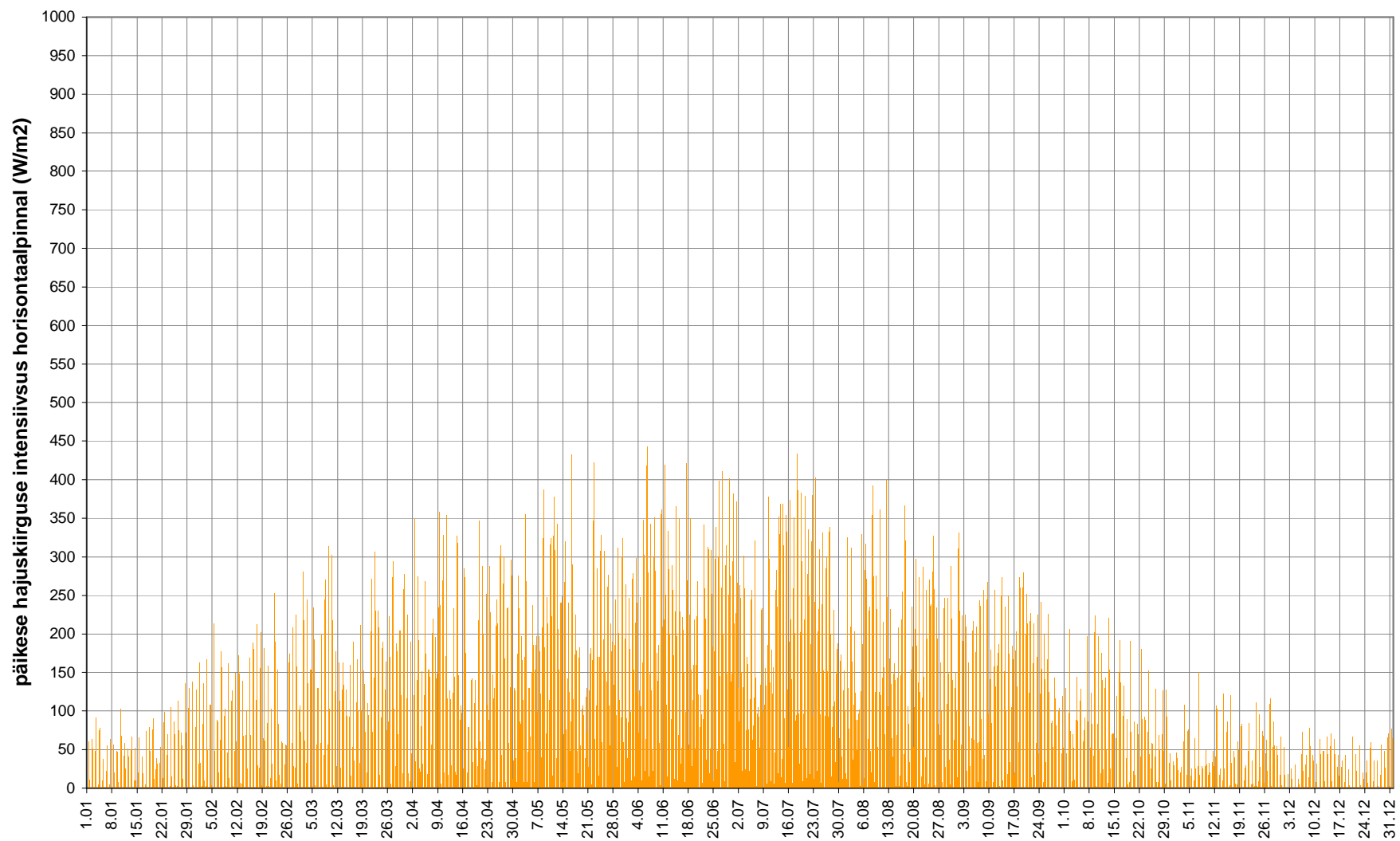
Joonis 2. Suhtelise õhuniiskuse tunnikeskised andmed vastavalt Eesti energiaarvutuste testaastale [Kalamees and Kurnitski 2006 järgi].



Joonis 3. Tuule kiiruse tunnikeskmsed andmed vastavalt Eesti energiaarvutuste test aastale [Kalamees and Kurnitski 2006 järgi].



Joonis 4. Päikese otsekiirguse tunnikeskmiised intensiivsused vastavalt Eesti energiaarvutuste testaastale [Kalamees and Kurnitski 2006 järgi].



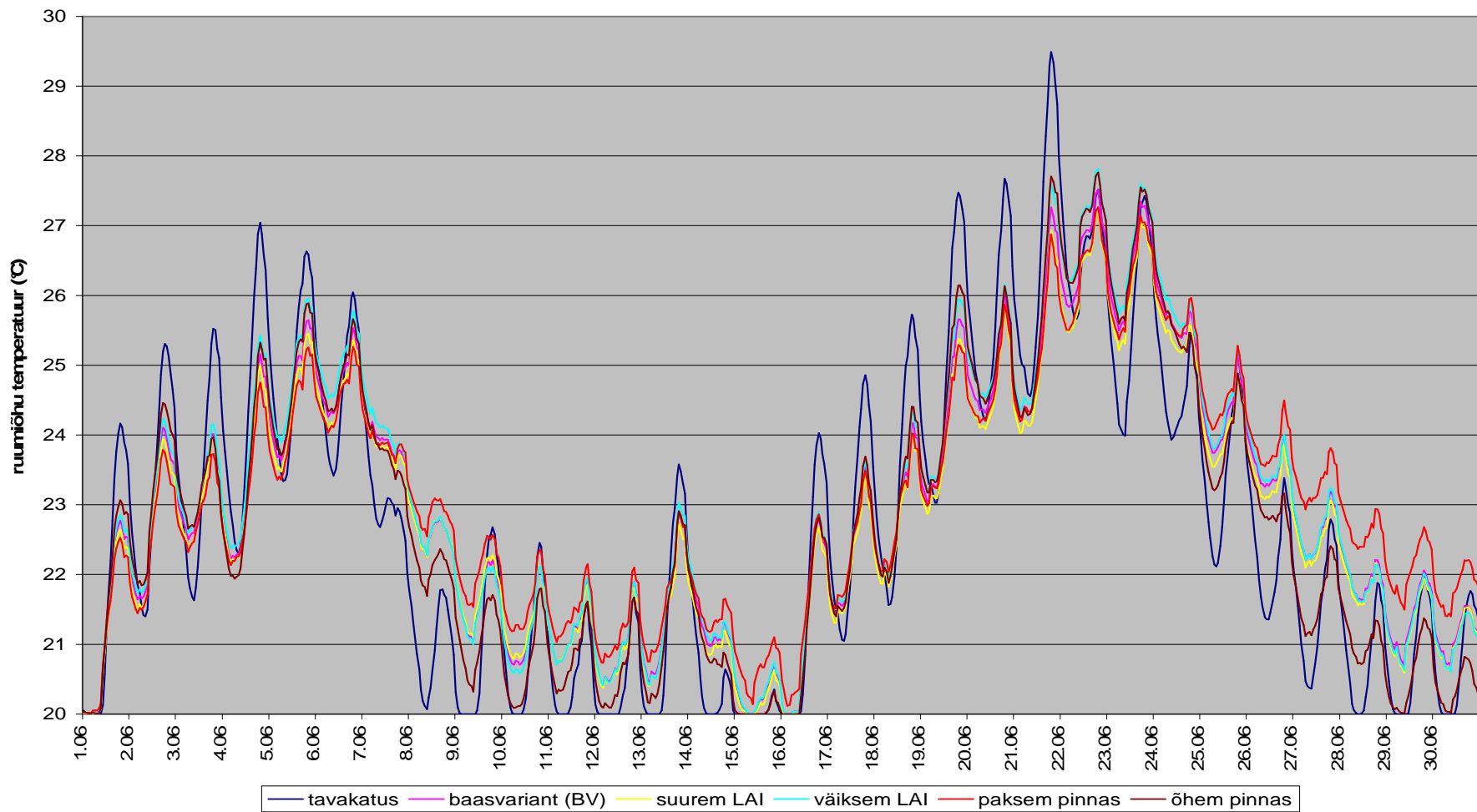
Joonis 5. Päikese hajuskiirguse tunnikeskised intensiivsused vastavalt Eesti energiaarvutuste test aastale [Kalamees and Kurnitski 2006 järgi].

Lisa 2. Analüüsitud hoone välispiirete soojusjuhtivuse näitajad ning olulisemad sisekasutuse ning tehnosüsteemide parameetrid.

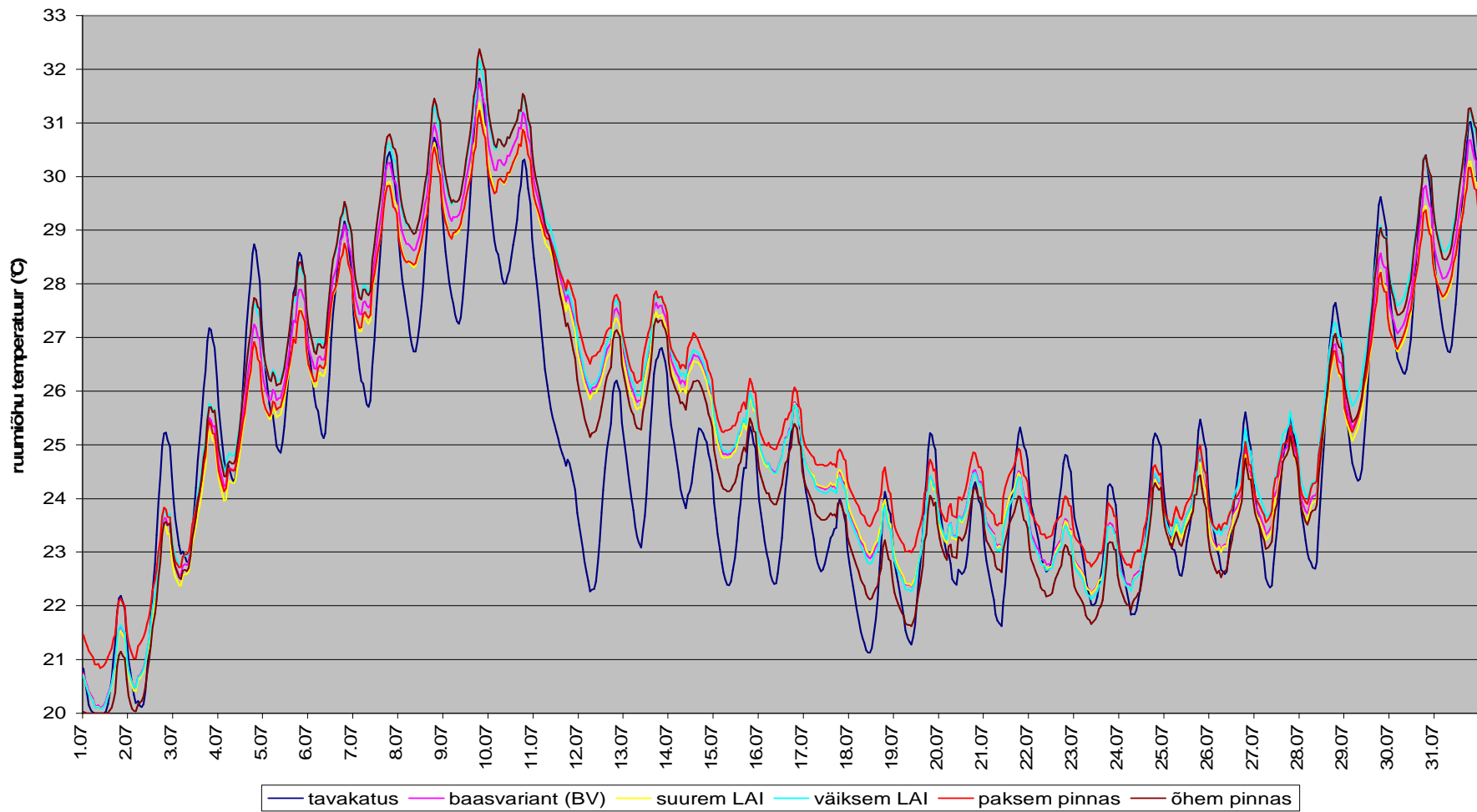
Tabel 1. Analüüsitud hoone välispiirete soojusjuhtivuse näitajad ning olulisemad sisekasutuse ning tehnosüsteemide parameetrid

hoone geomeetria ja asend	vastavalt projekt-dokumentatsioonile
Välispiirded:	
välisseina soojusjuhtivus	0,28 W/m ² K
aluspõranda soojusjuhtivus	1,975 W/m ² K
avatäidete soojusjuhtivus	1,8 W/m ² K
katuslae soojusjuhtivus:	
..soojustamata katuse korral	4,1 W/m ² K
..minimaalselt soojustatud katuse korral	0,225 W/m ² K
..projektikohase soojustamise korral	0,157 W/m ² K
hoone katuse pindala	410 m ²
Õhuvahetus:	
kontrollimatu õhuvahetus läbi pragude	0,15 h ⁻¹
ventilatsioonimaht	0,12 l/s*m ²
ventilatsiooni töögraafik	konstantne väljatõmme
Soojaeraldus sisemistest allikatest:	
valgustuse ja elektriseadmete soojaeraldus	5 W/m ²
valgustuse ja elektriseadmete töögraafik:	
tööaeg tööpäeviti	18:00 kuni 23:00
tööaeg nädalavahetusel	10:00 kuni 24:00
inimeste tihedus hoones	0,04 in/m ²
inimeste ajaline kohalolek hoones:	
kell 22:00 kuni 06:00	100%
kell 06:00 kuni 09:00	50%
kell 09:00 kuni 13:00	10%
kell 13:00 kuni 16:00	20%
kell 16:00 kuni 19:00	50%
kell 19:00 kuni 22:00	80%

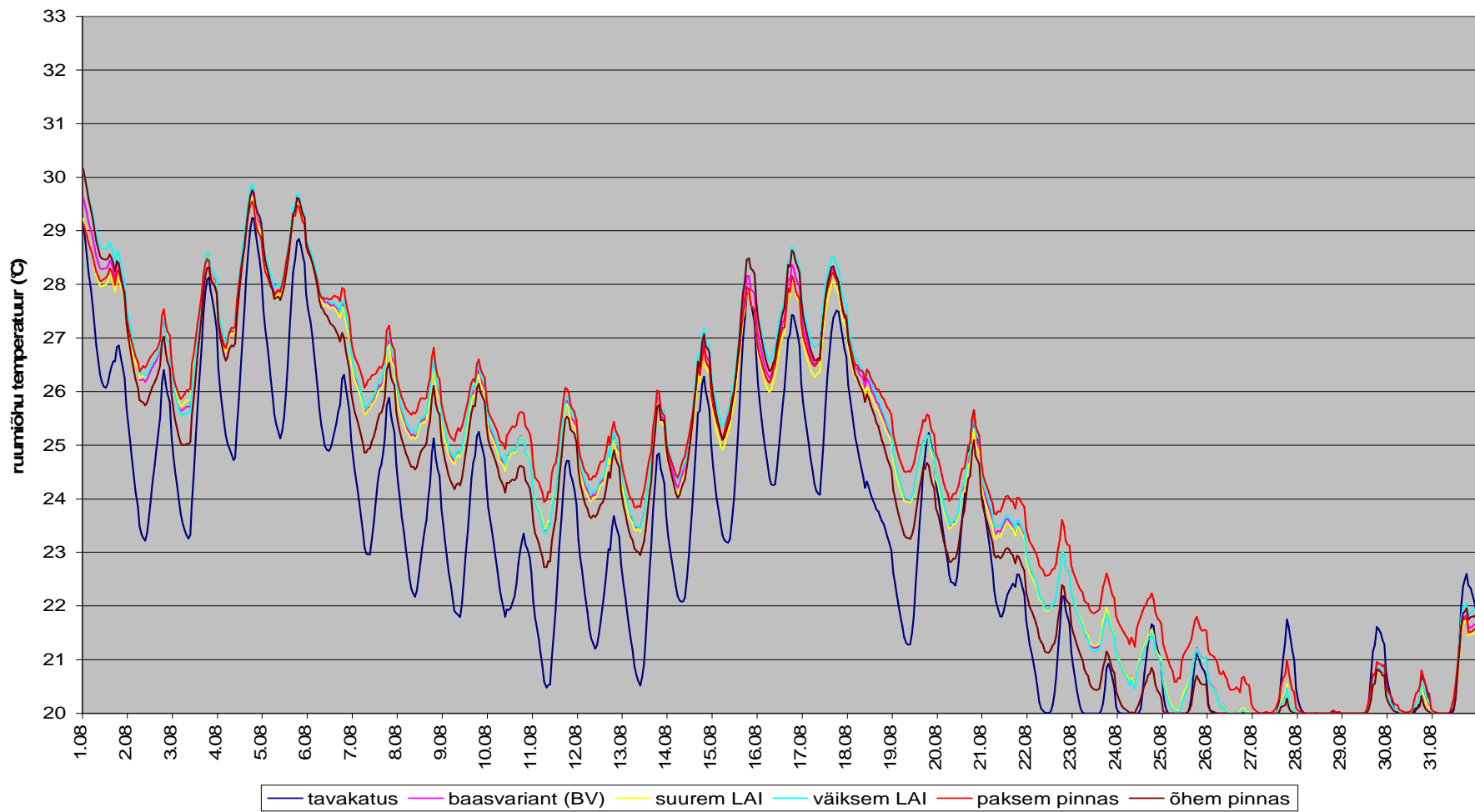
Lisa 3. ruumitemperatuuride dünaamika suvekuude lõikes



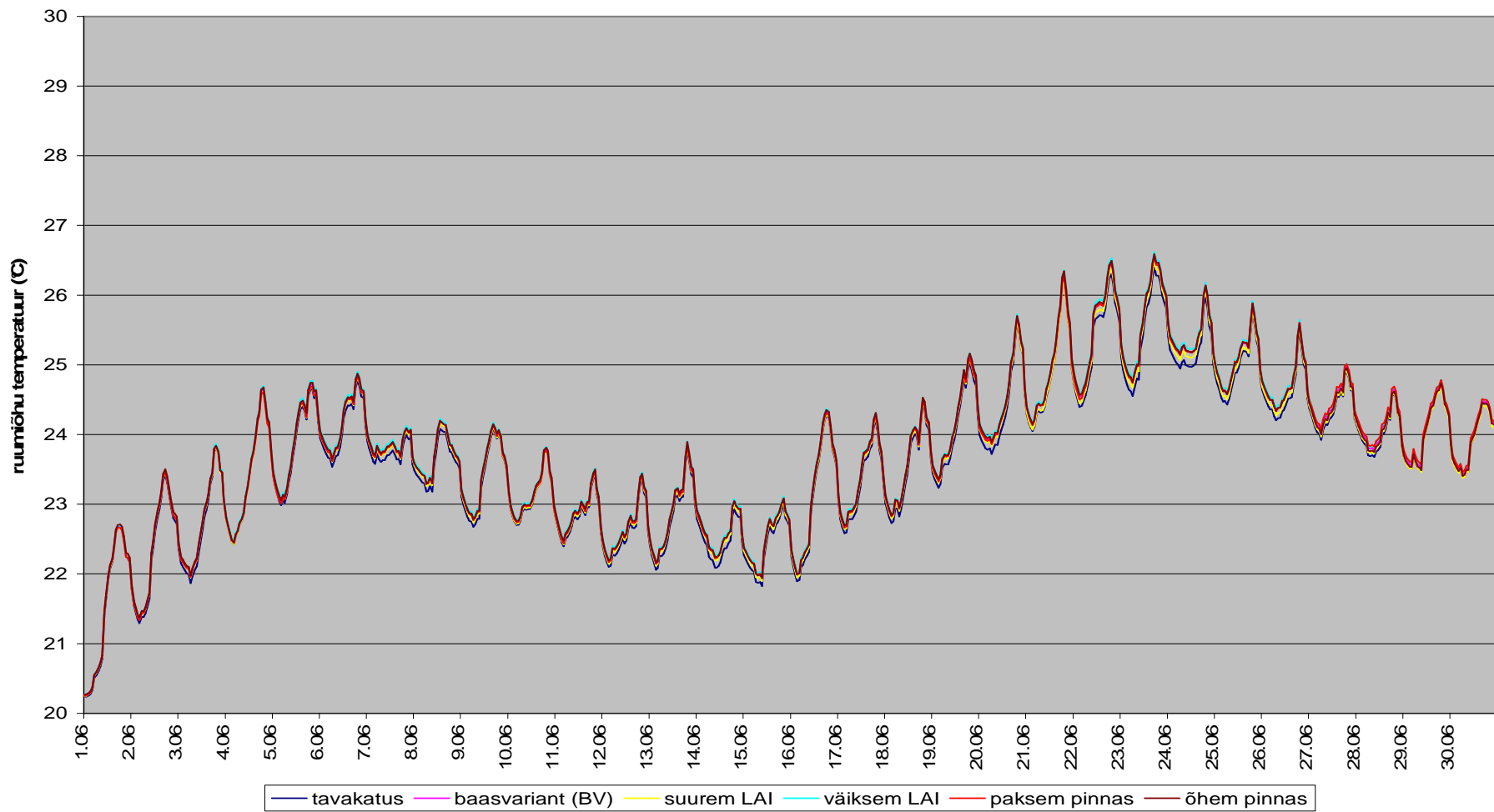
Joonis 6. Ruumiõhu temperatuuride käigid juunikuu tundide lõikes uuritava hoone katusekorrusel soojustamata tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.



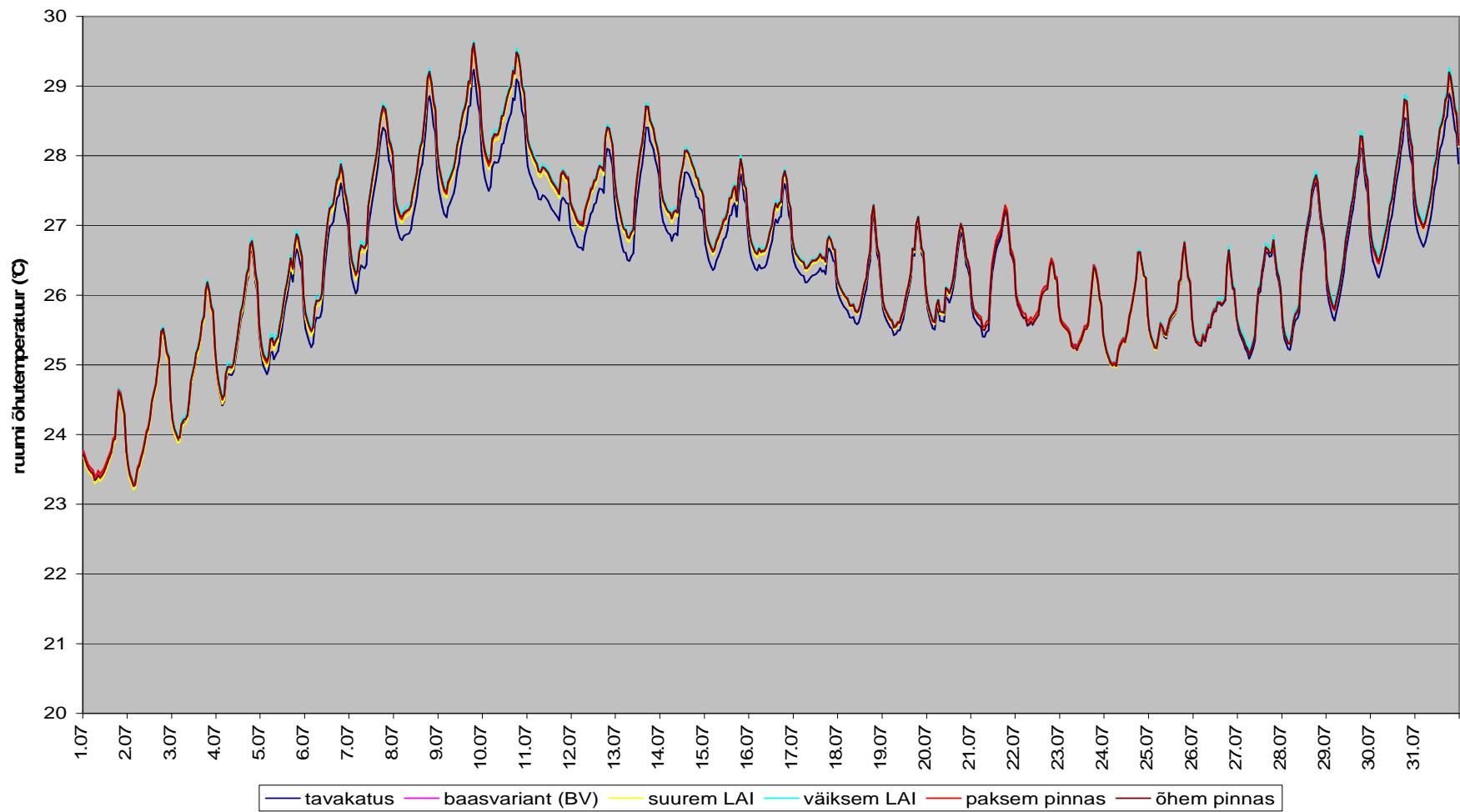
Joonis 7. Ruumiõhu temperatuuride käigid juulikuu tundide lõikes uuritava hoone katusekorrusel soojustamata tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.



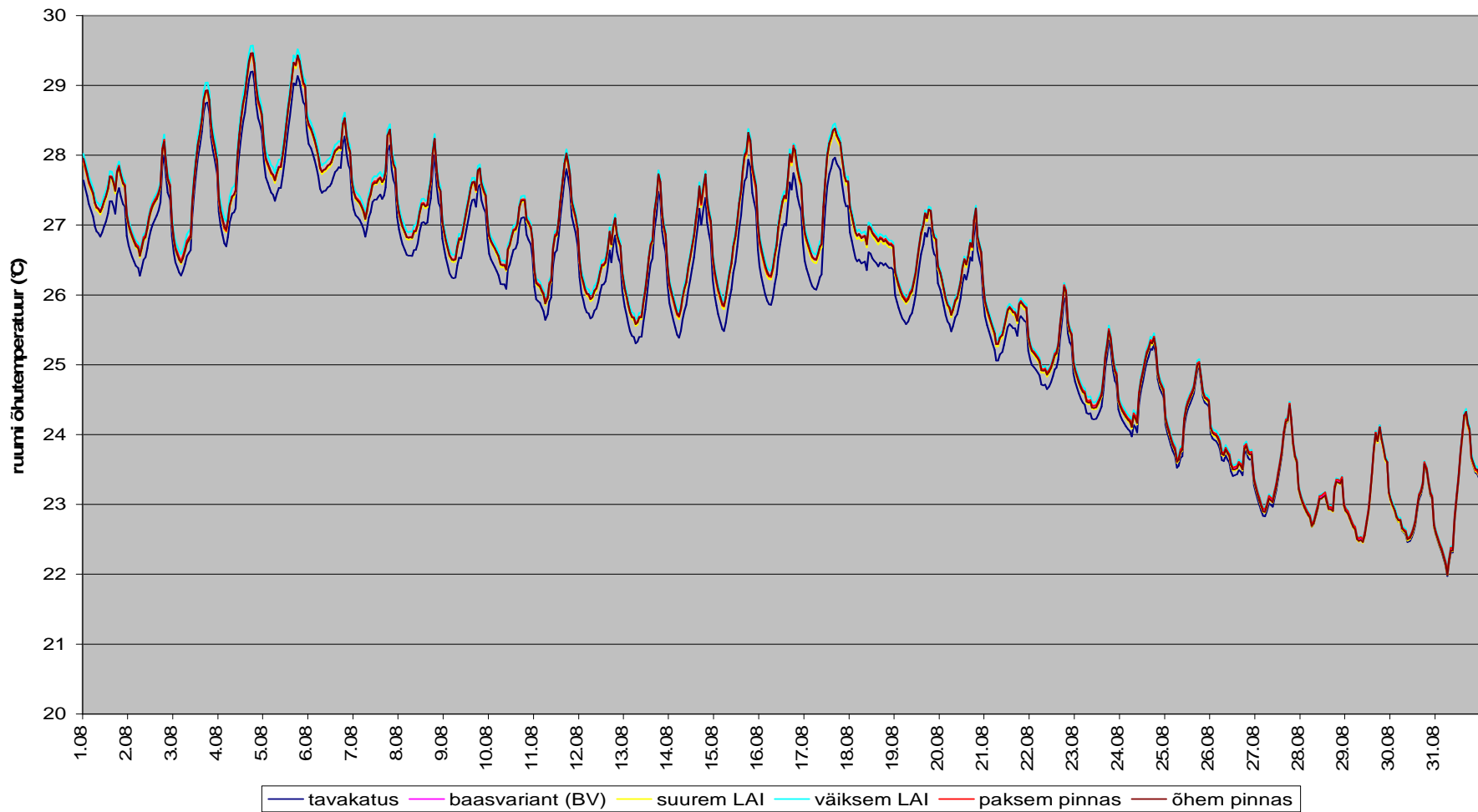
Joonis 8. Ruumiõhu temperatuuride käigud augusti kuu tundide lõikes uuritava hoone katusekorrusel soojustamata tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.



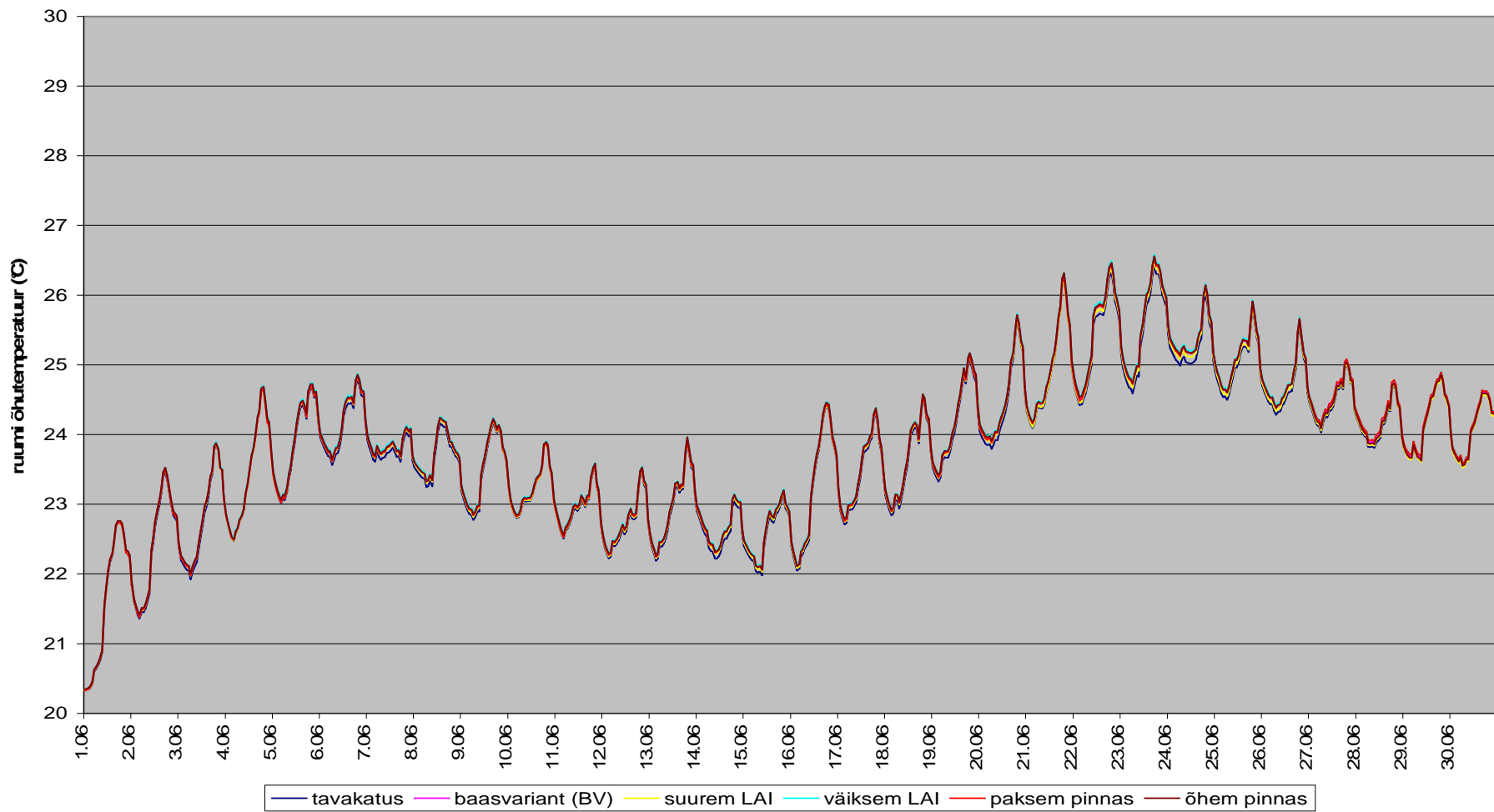
Joonis 9. Ruumiõhu temperatuuride käigud juunikuu tundide lõikes uuritava hoone katusekorrusel minimaalselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.



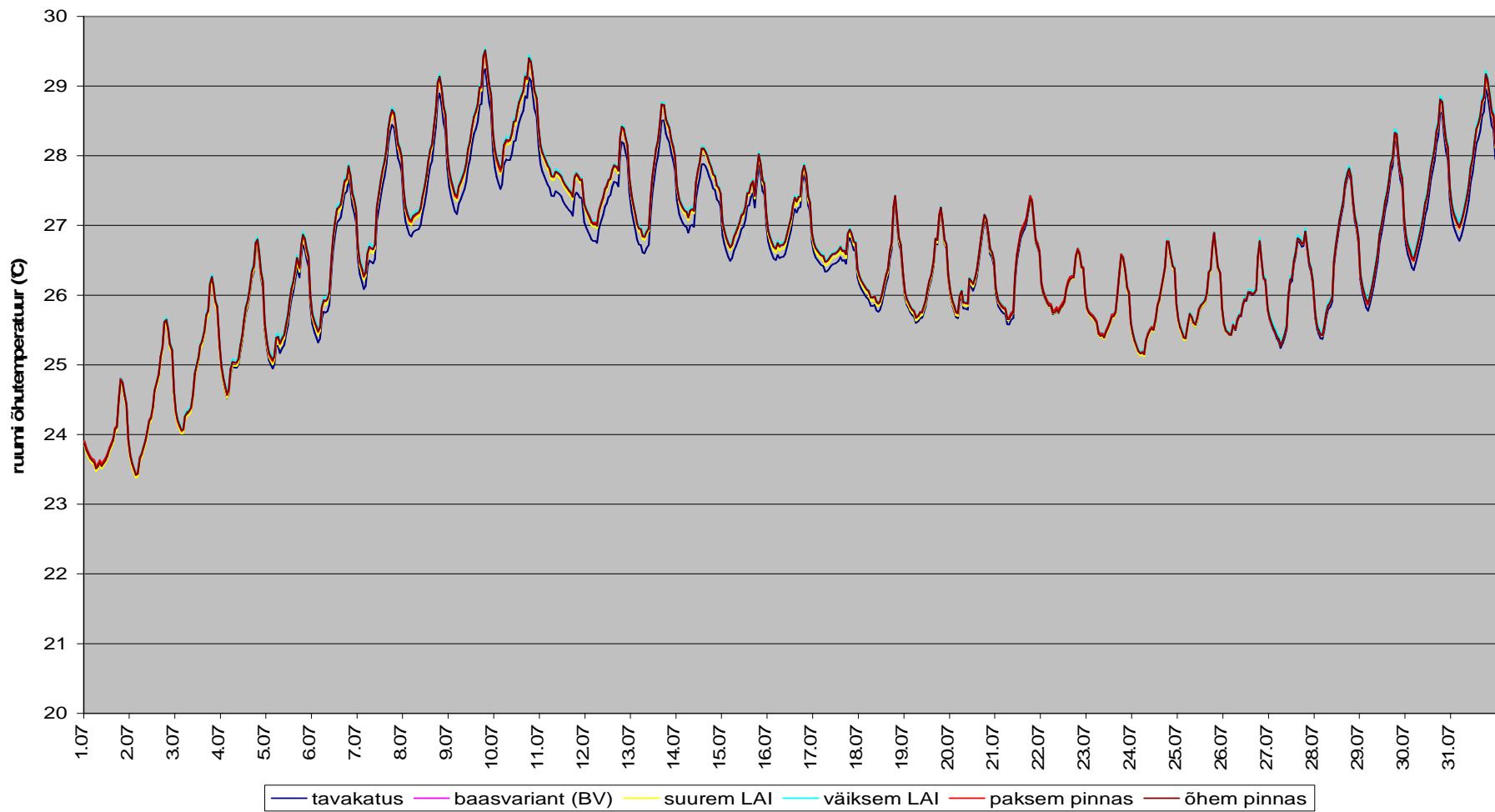
Joonis 10. Ruumiõhu temperatuuride käigid juulikuu tundide lõikes uuritava hoone katusekorrusel minimaalselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.



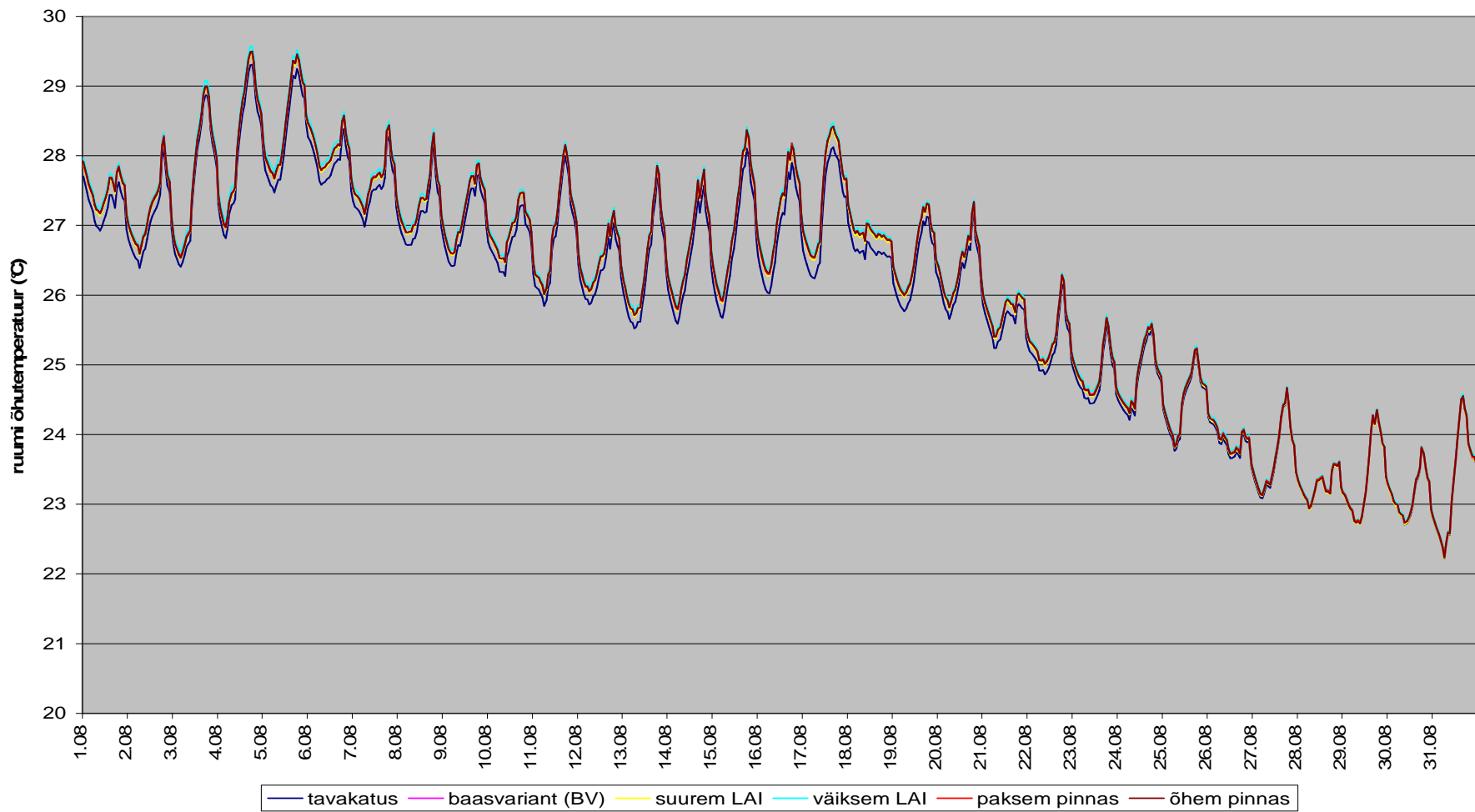
Joonis 11. Ruumiõhu temperatuuride käigud augusti kuu tundide lõikes uuritava hoone katusekorrusel minimaalselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.



Joonis 12. Ruumiõhu temperatuuride käigud juunikuu tundide lõikes uuritava hoone katusekorrusel projektikohaselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.



Joonis 13. Ruumiõhu temperatuuride käigud juulikuu tundide lõikes uuritava hoone katusekorrusel projektikohaselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.



Joonis 14. Ruumiõhu temperatuuride käigud augusti kuu tundide lõikes uuritava hoone katusekorrusel projektikohaselt soojustatud tavakatuse ja vastavate murukatuse variantide puhul.