



## SISEÕHU KVALITEET PÕHU- JA PILLIROOPAKKIDEST SEINTEGA ELUMAJADES

### INDOOR AIR QUALITY IN RESIDENTIAL BUILDINGS WITH STRAW- AND REED-BALE WALLS

Jane Raamets, Aime Ruus, Mari Ivask, Lembit Nei, Karin Muoni

Tallinna Tehnikaülikool, inseneriteaduskond, Tartu kolledž, Puiestee 78, 51008 Tartu

Saabunud: 11.02.2020  
 Received: 11.02.2020  
 Aktsepteeritud: 08.05.2020  
 Accepted: 08.05.2020  
 Avaldatud veebis: 12.05.2020  
 Published online: 12.05.2020  
 Vastutav autor: Jane Raamets  
 Corresponding author: Jane Raamets  
 E-mail: jane.raamets@taltech.ee  
 Phone: +372 620 4806

**Keywords:** mould, indoor air, straw-bale walls, reed-bale walls, propagules.

DOI: 10.15159/jas.20.05

**ABSTRACT.** Straw and reed are natural local insulation- and construction materials, which properties allow them to replace energy intensive building materials. In general, straw and reed as building materials are considered harmless to the environment and human health. Unfortunately, the use of these materials may bring about mould growth in buildings which may result in different diseases (for example irritation of eyes, nose and throat, allergic rhinitis, conjunctivitis, and asthma) in people with weaker immune systems. No research has been carried out on the topic of microbiological community in straw and reed houses in climatic conditions similar to Estonia, although buildings made of natural materials are becoming more and more popular. The aims of the study were to investigate the indoor climate of buildings with straw and reed-bale walls and to determine the factors influencing indoor air quality. In order to fulfil the set aim: (1) air quality was tested in the bedrooms of the studied houses, and the microbial species in air and walls were determined; (2) the indoor air quality parameters (CO<sub>2</sub>, RH%, and temperature) in air and at two different heights in the walls were measured. The results enable to conclude that the walls of straw or reed-bale house are suitable in Estonian climatic conditions, which as a result of professional design, usage of materials suitable for building, and high-quality craftsmanship provides a healthy and environmentally friendly housing.

© 2020 Akadeemiline Põllumajanduse Selts. | © 2020 Estonian Academic Agricultural Society.

#### Sissejuhatus

Inimesed veedavad erinevatele uuringutele tuginedes 80–90% oma ajast siseruumides (Horr jt, 2016; Katsoyiannis, Cincinelli, 2019) ning umbes kolmandik inimese eluajast veedetakse magades (Strøm-Tejsen jt, 2015). Viimastel aastatel on publitseeritud hulgaliselt siseõhu kvaliteeti käsitlevaid uuringuid, kuid magamistoat, kus inimesed veedavad 7–8 järjestikust tundi oma päevast, leiavad sellistes uuringutes väga vähe käsitlemist (Strøm-Tejsen jt, 2015; Canha jt, 2019).

Pilliroog ja teraviljapõhk on materjalid, millest ehitamine on viimasel kümnendil järjest enam populaarsust kogunud. Sellistest materjalidest ehitamine on säästlik nii keskkonnale kui võimaldab kokku hoida ka energiat, mida on vaja hoonete kütteks ja jahutamiseks (Milutiené jt, 2012). Olgugi, et põhk ja pilliroog on lihtsasti hangitavad ja naturaalsel kujul ka odavad materjalid, on tegemist materjalidega, mis võivad olla

potentsiaalseteks ohuallikateks inimese tervisele. Koosnedes tselluloosist, hemitselluloosist ja ligniinist, on looduslikud materjalid heaks elupaigaks mikroorganismidele. Pidev eksponeeritus hallitusseentele võib põhjustada probleeme nõrgenenud immuunsüsteemiga inimestele, kroonilistele haigetele, lastele ja vanuritele (Portnoy jt, 2005; Hernberg jt, 2014).

Looduslike materjalide kasutamine ehituses kogub üha enam populaarsust. Uuringud näitavad, et võrreldes roopakist elamutega nõuab kivihoonete kütmine ja jahutamine rohkem energiat (Barreca jt, 2019). Pilliroo lisamine betoonisegule vähendab oluliselt materjali soojusjuhtivust (Shon jt, 2019). Rooehitised olid tuntud juba Sumeri kultuuris 5000 aastat tagasi ja Iraagi aladel on nad laialdaselt kasutusel ka tänasel päeval (Al-Jumeily jt, 2018). Need paistavad silma tervisliku sisekliima poolest ja roo kõrge ränisisaldus muudab selle materjali ebaatraktiivseks putukatele ning teiste



loomadele (Al-Jumeily jt, 2018). Puudustena tuleb aga välja tuua tuletundlikkust ja madalat survetugevust, mistõttu saab ehitada kandvate seintega ainult ühekordseid hooneid (Al-Jumeily jt, 2018). Kui roog on lõigatud vael aastaajal, siis võib see kaasa tuua materjali lagunemise (Al-Jumeily jt, 2018). Seentel on oluline roll orgaaniliste ehitusmaterjalide lagundamisel (Raamets jt, 2017). 20–40% Euroopa ja Põhja-Ameerika hoonete sisekliima on mõjutatud hallitusest, millega kaasnevad erinevad terviseprobleemid (Laborel-Préneron jt, 2018). On leitud, et roog on tundlik mädaniku suhtes, kuid lagunemisprotsessi on võimalik olulisel määral alla suruda termilise töötlemise abil (Brischke, Hanske, 2016).

Mitmed autorid on oma uurimustes näidanud, et hallitusseened põhul võib jagada vee vajaduse järgi kolme rühma. Primaarsed koloniseerijad kuuluvad perekondadesse *Wallemia*, *Penicillium*, *Aspergillus* ja *Eurotium*, sekundaarsed koloniseerijad perekondadesse *Cladosporium*, *Ulocladium* ja *Alternaria* ning tertsiarsed koloniseerijad perekondadest *Stachybotrys*, *Chaetomium*, *Trichoderma* ja *Auraeobasidium* (Grant jt, 1989; Gravesen jt, 1994, Nielsen jt, 2004). Eesti päritolu teravilja tüüpilised hallitusseened kuuluvad perekondadesse *Cladosporium*, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Helminthosporium*, *Mucor* ja *Rhizopus* (Lõiveke jt, 2008). Perekonda *Aspergillus* kuuluvate liikide esinemine on iseloomulik just Lõuna-Eestile (Lõiveke, 2008). Ka siseõhus on seeneperekonnad *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cladosporium* ja *Penicillium* levinuimad (Zorman, Jeršek, 2008, Bernasconi jt, 2010).

Esimesed teadaolevad põhupallidest hooned püstitati 19. sajandi lõpul Nebraskas, põhjuseks eelkõige elanike vaesus (Henderson, 2007). Üks vanemaid sealseid põhupallidest hooneid, pärineb aastast 1903 (King, 2006). Sellist pikaajalist põhjendatuse kuiva kohaliku kliimaga (Henderson, 2007). Tänapäeval leidub põhupallidest tehtud maju Ameerika Ühendriikides, Euroopas, Kanadas, Austraalias ja Aasias (Holzhueter, Itonaga, 2010). Holzhueter ja Itonaga väidavad, et hallituse tekkimise oht on põhuelamute korral ülepaisutatud. Hallituse tekke vältimisel annavad erilisel positiivset efekti vihmatõkked (Holzhueter, Itonaga, 2017). Siiani ei ole meie kliimavõtmes tehtud arvestatavaid uuringuid selle kohta, millised mikroobid põhul ja pillirool kui ehitusmaterjalil elutsevad, milline on siin ehitatud põhu- ja roopakkidest seintega elamute sisekliima ning käesoleva töö eesmärgiks uurida komplekselt Eesti roo- ja põhuelamute sisekliimat ning seda mõjutavaid tegureid.

### Materjal ja meetodika

Püstitatud eesmärgi saavutamiseks:

- Võeti õhuproovid uuritavate elamute magamistubadest ning välisõhust ja materjaliproove välispiiretest. Määrati nii sise- kui ka välisõhus ning piiretes leiduvad seened perekonna tasemeni;

- Määrati sisekliima näitajad (RH% ja temperatuur) elamute siseõhust (määrati lisaks ka CO<sub>2</sub>) kui ka kahelt erinevalt kõrguselt (0,2 ja 1,2 m) välisseintes;
- Hinnati välisseinte niiskuskoozumust ja hallituse ohtu.

### Ülevaade uuritud objektidest

Uuringu käigus võeti proove ja koguti andur-andmesalvestistega andmeid neljast põhu- ja neljast roopakkidest ehitatud seintega elamust. Osa elamutest (kaks põhu- ja üks roopakkidest seintega) oli ehitatud Nebraska stiilis, osa karkassiga (üks põhu- ja kolm roopakkidest seintega), ühe põhupakkidest seintega elumaja puhul on ehitusel kasutatud tehases valmistatud mooduleid. Kõik uuritud elamud on projekteeritud ja ehitatud vastava kogemusega projekteerijate ja ehitusettevõtete poolt. Visuaalsel vaatlusel niiskuskahjustusi ja hallituse kasvu ei tuvastatud. Uuritud elamute vanus jäi 2–7 aasta vahele.

Elamute keskmine välisseina paksus oli 50 ± 5 cm, erandiks oli elumaja, mille sein paksus oli 100 cm. Kõik seinad olid krohvitud nii seest kui ka väljast. Krohvikihi paksus oli enamasti nii sees kui ka väljas 5 cm, erandiks olid kaks elamut. Ühe elamu seinte krohvikihi paksus oli nii seest kui ka väljast 7 cm (lubikrohv), teisel elamul oli välisseina sisepinnal 10 cm krohvi, välisseinas 12 cm krohvi. Krohvimiseks oli kasutatud enamasti savikrohvi, kahe elamu puhul oli kasutusel nii sise- kui ka välisviimistlusel lubikrohv. Kõigil uuritud elamutel oli küllaltki kõrge sokkel, lai räästas (joonis 1), mis on oluline abinõu vähendamaks seinte niiskuskoozumust.

Vundamendina kasutati nii madalvundamenti (viis elamut) kui ka postvundamenti (3). Kõikide põrandate konstruktsioon oli puidust. Katusekattematerjaliks on kolme elamu puhul laast, kolme elamu puhul rullmaterjal/PVC, ühel elamul kivi ja ühel elamul on rohekatus.

### Kasutatud meetodika

Töös peeti oluliseks uurida elamuid komplekselt, katsed viidi läbi perioodil oktoober 2014 – oktoober 2016, kogudes paralleelselt sisekliima parameetrite (temperatuur, RH, CO<sub>2</sub>) ning mikrobioloogia andmeid (pesa moodustavate ühikute arv ja taksonoomiline koosseis) nii õhust kui ka välispiirde (seinte) materjalist.

Elanikel paluti kuus tundi enne proovide võtmist magamistube mitte tuulutada. Sõotmed (linnasesööde (MEA) ja dikloraan 18% sööde (DG18)) valmistati ja proovivõtuprotseduur viidi läbi ISO standardist 16000-18 juhindudes (ISO 16000-18:2011). Sõotmekomponendid kaaluti analüütilise kaaluga (ABJ 120-4M, Kern & Sohn, Balingen, Saksamaa). Sõotmed autoklaaviti, kasutades HMT 260 MB autoklaavi (HMC Europe, Tüssling, Saksamaa). Proovid koguti õhuanalüsaatoritega Mirobio MB2 (Cantum Scientific, Dartford, Ühendkuningriik) 9 cm Petri tassidele neli korda aastas (kevad, suvel, sügisel ja talvel) magamistubadest ühe meetri kõrguselt põrandapinnast. Proovivõtu aeg oli üks minut ja õhu kogus 100 liitrit proovi kohta. Igalt

alalt koguti kokku neli paralleelproovi mõlema söötme-ga. Referentsina koguti õhuproovid nelja paral-leelina ka välisõhust 1,5 m kõrguselt maapinnast. Kogutud proove töödeldi, lähtudes EVS-ISO standar-dist 16000-17 (EVS-ISO 16000-17:2012.). Proove inkubeeriti 25 °C juures seitse päeva, peale mida loeti pesa moodustavad ühikud (PMÜ). Puhaskultuuride saamiseks teostati edasised külvid. Seened määrati

morfoloogiliste tunnuste alusel mikroskoobi abil (SP100, Brunel Microscopes LTD, Chippenham, Ühendkuningriik). Värvimiseks kasutati laktofenool-puuvillasinist. Väljakülvid identifitseeriti perekonda-deni, kasutades selleks erinevaid määrajaid (Domsch jt, 1980; Kilch, 1988; Samson jt, 1996; Bergey jt, 2000; Larone, 2002; Winn, Koneman, 2006; Watanabe, 2010).



**Joonis 1.** Näited uuritud elamute soklist (vasakpoolne pilt) ja räästast (parempoolne pilt)  
**Figure 1.** Examples of plinths (left image) and eaves (right image) of the studied buildings

Välispiiretest (seinast) võeti ka põhu- ja roomaterjali uurimiseks proove, kasutades selleks varem välja töötatud meetodikat (Raamets jt, 2016). 10-grammise mahuga proovid plaaditi otse linnaseagarile (MEA), kuhu oli lisatud klooramfenikooli. Proove inkubeeriti 32 °C juures 72 tundi ning seejärel loendati kokku pesa moodustavad ühikud (PMÜ).

Lisaks koguti taustandmeid ühe andur-andmesalvestiga süsihappegaasi sisalduse, temperatuuri ja õhuniiskuse kohta uuritavate elamute magamistubadest (andur paiknes 1,2 m kõrgusel põrandapinnast, salvestades 30-minutilise intervalliga). Andmeid koguti ka temperatuuri ja õhuniiskuse kohta piiretes 20 cm sügavusel sisepinnast. Selleks puuriti piiretes kahele kõrgusele (0,2 ja 1,2 m) 7 mm läbimõelduga augud. Aukudesse asetati 20 cm sügavusele andur-andmesalvestitega mõõtepead ning automaadmõõtmisi teostati 10-minutilise intervalliga. Aukude sulgemiseks kasutati krohvi ja mingil määral vajas kinni ka kõrreline materjal ise.

Väliskliima andmetena kasutati Riigi Ilmateenistuse poolt mõõdetud andmeid uuritud elamutele lähimast automaatjaamast (Tallinna, Lääne-Nigula, Türi, Väike-Maarja). 2014. aasta november oli tavaliselt soojem (2,4 °C (norm 1,2 °C)). Nii 2014–2015 kui ka 2015–2016 aasta talv oli normist soojemad. 2015. aasta oli viimase poole sajandi kõige soojem aasta (keskmine õhutemperatuur 7,6 °C (norm 6,0 °C)) (Riigi Ilmateenistus, 2020).

Piirete niiskuskooormuse hindamiseks kasutati valemit 1, mis pärineb standardist EVS-EN ISO 13788 (EVS-EN ISO 13788:2012). Niiskuskulisa  $\Delta v$  ( $\text{g m}^{-3}$ ) arvutati valemist:

$$\Delta v (\text{g m}^{-3}) = v_i - v_e \quad (1)$$

kus:

$v_i$  – siseõhu veeaurisisaldus / water vapour content (indoor air),  $\text{g m}^{-3}$ ;

$v_e$  – välisõhu veeaurisisaldus / water vapour content (outdoor air),  $\text{g m}^{-3}$ .

Hallituseohu hindamiseks kasutati Hukka ja Viitaneni (1999) poolt avaldatud matemaatilist mudelit, mis kasutab nii suhtelise niiskuse kui ka temperatuurandmeid hallitusindeksi arvutamiseks.

#### Kemikaalid ja töövahendid

Kõik tööks vajalikud kemikaalid ja reagensid osteti ettevõttest HNK Analüüsitehnika OÜ (Tallinn, Eesti). Soja baasil toodetud peptoon ( $\geq 99\%$ , Fluka), kaaliumdivesinikfosfaat ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) (puhtusaste  $\geq 99\%$ , Sigma Aldrich), magneesiumsulfaat heptahüdraat ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) (puhtusaste  $\geq 99,5\%$ , Sigma Aldrich), D-(+)-glükoos ( $\geq 99,5\%$ , Sigma Aldrich), dikloraan (2,6-dikloro-4-nitroaniliin) (puhtusaste  $\geq 96\%$ , Sigma Aldrich), klooramfenikool (puhtusaste  $\geq 98\%$ , Sigma Aldrich), glütserool (puhtusaste  $\geq 99,96\%$ , Sigma Aldrich), vesi (deioniseeritud, Sigma Aldrich). Agar (Sigma Aldrich), linnaseekstrakt (Sigma Aldrich), laktofenool-puuvillasinise (hallitusseente värvimiseks, Sigma Aldrich) vastasid standardis (ISO, 2011). Mikrobioloogilisteks külvideks vajalikud vahendid (Petri tassid (9 cm), inokulatsiooninõelad, alus- ja katteklaasid) osteti KRK OÜ (Tartu, Eesti).

Söötme komponendid kaaluti analüütilise kaaluga ABJ 120-4M (mõõtetäpsus  $\pm 0,2$  mg, tootja: Kern & Sohn, Balingen, Saksamaa). Söötmed autoklaaviti, kasutades HMT 260 MB autoklaavi (HMC Europe,

Tüssling, Saksamaa). Söötmeplaadid valati tömbekapi all (vastab ISO 13150 standardile, Retent AS, Nõo, Eesti). Proovid koguti õhuanalüsaatoritega Mirobio MB2 (Cantum Scientific, Dartford, Ühendkuningriik). Laboris valmistati destilleeritud vett seadmega RO01033 (ROWA, Heimsheim, Saksamaa).

Andmeid koguti igas magamistoas ka süsihappegaasi (CO<sub>2</sub>) sisalduse, õhutemperatuuri ja niiskuskaitajate kohta andur-andmesalvestitega Green-Eye mudel 7798 (mõõtetäpsus süsinikdioksiidi mõõtmisel ±50 ppm, temperatuuri mõõtmisel ±0,6 °C, õhuniiskuse mõõtmisel ±3% (10–90%), tootja: TechGrow, Haag, Holland). Piiretest temperatuuri ja niiskuskaitajate kogumiseks kasutati Hobo UX100-023 andur-andmesalvesteid (mõõtevahemik –20°C kuni +70 °C, 5 kuni 95% RH, täpsus vastavalt ±0,35 °C ja ±2,5% RH, tootja Onset Computer Corporation, Bourne, Ameerika Ühendriigid).

## Tulemused

### Hallitusseente arvukus ja dünaamika sise- ja välisõhus aastaegade lõikes ning hallitusseente koosseis perekondade lõikes

Sesoonne pesa moodustavate ühikute dünaamika on nii põhust kui ka roopakist ehitatud elamute magamistubade puhul sarnane (tabelid 1 ja 2). Erinevused esinevad moodustavate ühikute arvus. Kõige arvukam oli siseõhu mikroobikooslus põhupakkidest seintega elamutes suvel (tabel 1) (juuni–august), mil siseõhust kultiveeritavaid kolooniaid linnaseagarilt (MEA) oli keskmiselt 537 ± 102 PMÜ m<sup>3</sup><sup>-1</sup>. Sama seos esines ka roopakkidest seintega elamute puhul, mil suvel siseõhust kultiveeritavaid kolooniaid linnaseagarilt oli keskmiselt 858 ± 106 PMÜ m<sup>3</sup><sup>-1</sup>. Välisõhus (tabel 2) registreeriti samal ajal põhupakkidest seintega elamutel linnaseagarilt 289 ± 32 PMÜ m<sup>3</sup><sup>-1</sup> ja roopakkidest seintega elamutel 353 ± 41 PMÜ m<sup>3</sup><sup>-1</sup>. Kevadel ja sügisel jäid nii sise- kui ka välisõhust linnaseagarile võetud proovide puhul tulemused võrreldavale tasemele. Diglütserool 18% söötlele (DG18) võetud proovid olid samuti kõrgemad nii sise- kui ka välisõhus just suveperioodil ning madalaimad talvel.

Uuringu käigus identifitseeriti siseõhu hallitusseeni perekonna tasemeni (tabel 3). Talveperioodil kuulus kõige enam identifitseeritud seentest põhupakkidest seintega elamutes perekonda *Penicillium* (74%), järgnesid perekondadesse *Aspergillus* (17%), *Alternaria* (1%) ja *Cladosporium* (1%) kuuluvad hallitusseened, 7% hallitusseentest ei kuulunud eelnevalt mainitud perekondadesse. Roopakkidest seintega elamute puhul oli

järgnevus perekondade lõikes sama ning erinevused esinesid osakaaludes *Penicillium* – 70%, *Aspergillus* – 19%, *Cladosporium* – 6%, *Alternaria* – 1%; 4% leitud hallitusseentest ei kuulunud eelnimetatud perekondadesse.

**Tabel 1.** Sesoonsed muutused pesa moodustavate ühikute (PMÜ) arvukuses siseõhus näidatuna aastaaja keskmisena elamute lõikes koos keskmise veaga (±SE) proovide lõikes m<sup>3</sup><sup>-1</sup> õhu kohta

**Table 1.** Seasonal variation in culturable airborne fungi indoors shown as mean with standard error (±SE), range of CFU m<sup>-3</sup> air

Proovivõtu koht Sampling site	Talv Winter	Kevad Spring	Suvi Summer	Sügis Autumn
Põhk (MEA)	149 ± 29	298 ± 100	537 ± 102	307 ± 99
Straw (MEA)				
Roopakk (MEA)	380 ± 136	518 ± 145	858 ± 106	548 ± 155
Reed (MEA)				
Põhk (DG18)	14 ± 8	29 ± 9	46 ± 12	20 ± 11
Straw (DG18)				
Roopakk (DG18)	22 ± 13	23 ± 9	36 ± 11	22 ± 10
Reed (DG18)				

MEA – linnaseagari sööde / Malt Extract Agar media; DG18 – diglütserool 18% sööde / 18% Dichloran glycerol agar (DG18) media

**Tabel 2.** Sessoonsed muutused pesa moodustavate ühikute (PMÜ) arvukuses välisõhus näidatuna aastaaja keskmisena elamute lõikes koos keskmise veaga (±SE) proovide lõikes m<sup>3</sup><sup>-1</sup> õhu kohta

**Table 2.** Seasonal variation in culturable airborne fungi outdoors shown as mean with standard error (±SE), range of CFU m<sup>-3</sup> air

Proovivõtu koht Sampling site	Talv Winter	Kevad Spring	Suvi Summer	Sügis Autumn
Põhk (MEA)	94 ± 19	197 ± 43	289 ± 32	168 ± 34
Straw (MEA)				
Roopakk (MEA)	118 ± 15	198 ± 48	353 ± 41	212 ± 34
Reed (MEA)				
Põhk (DG18)	18 ± 7	30 ± 9	50 ± 11	22 ± 10
Straw (DG18)				
Roopakk (DG18)	24 ± 9	27 ± 11	45 ± 12	23 ± 9
Reed (DG18)				

MEA – linnaseagari sööde / Malt Extract Agar media; DG18 – diglütserool 18% sööde / 18% Dichloran glycerol agar (DG18) media

Kevadel kuulus põhupakkidest seintega elamutes kõige enam identifitseeritud hallitusseeni perekonda *Cladosporium* (79%). Järgnesid perekonnad *Penicillium* (8%), *Aspergillus* (8%) ja *Alternaria* (3%). 2% hallitusseentest ei kuulunud eelnevalt mainitud perekondadesse. Roopakkidest seintega elamutes oli perekondade järjestus kevadel sama mis põhuelamutes: erinevused esinesid vaid esinemisprotsentide lõikes – *Cladosporium* (81%), *Penicillium* (7%), *Aspergillus* (7%) ja *Alternaria* (3%). 2% leitud seentest ei kuulunud eelnevatesse perekondadesse.

**Tabel 3.** Perekonna tasemeni identifitseeritud hallitusseente jaotumine perekondadesse aastaegade ja ehitusmaterjali lõikes. Esimene näitaja tähistab pesa moodustavate ühikute (PMÜ) arvu ja teine protsenti koguhulgast

**Table 3.** Distribution of molds identified by genus, by season and building material. The first figure represents the number of colony forming units (CFU) and the second percentage of the seasonal total

Hallitusseened Molds	Talv / Winter		Kevad / Spring		Suvi / Summer		Sügis / Autumn	
	põhk / straw	roopakk / reed	põhk / straw	roopakk / reed	põhk / straw	roopakk / reed	põhk / straw	roopakk / reed
<i>Alternaria</i>	1 (1)	4 (1)	9 (3)	16 (3)	32 (6)	43 (5)	25 (8)	49 (9)
<i>Aspergillus</i>	25 (17)	72 (19)	24 (8)	36 (7)	11 (2)	9 (1)	71 (23)	110 (20)
<i>Cladosporium</i>	1 (1)	23 (6)	235 (79)	420 (81)	451 (84)	738 (86)	92 (30)	142 (26)
<i>Penicillium</i>	110 (74)	266 (70)	24 (8)	36 (7)	38 (7)	51 (6)	95 (31)	203 (37)
Teised / Others	10 (7)	15 (4)	6 (2)	12 (2)	5 (1)	15 (2)	25 (8)	44 (8)

Suvel kuulus kõige enam identifitseeritud seentest põhupakkidest seintega elamutes siseõhus perekonda *Cladosporium* (84%), järgnesid *Penicillium* (7%), *Alternaria* (6%), *Aspergillus* (2%); 1% leitud hallitusseentest ei kuulunud eelnevalt mainitud perekondadesse. Roopakidest seintega elamute siseõhu puhul oli järgnevus sama: kõige enam leiti perekonda *Cladosporium* (86%) kuuluvaid hallitusseeni, järgnesid perekonnad *Penicillium* (6%), *Alternaria* (5%) ja *Aspergillus* (1%). 2% leitud hallitusseentest ei kuulunud eelnevalt mainitud perekondadesse.

Sügisel kuulus kõige enam põhuelamute siseõhus identifitseeritud hallitusseentest perekonda *Penicillium* (31%), järgnesid perekonnad *Cladosporium* (30%), *Aspergillus* (23%) ja *Alternaria* (8%). 8% põhuelamutest leitud seentest ei kuulunud eelnevalt mainitud perekondadesse. Roopakist elamute siseõhu puhul kuulus kõige enam hallitusseeni sügisel perekonda *Penicillium* (37%), järgnesid perekondadesse *Cladosporium* (26%), *Aspergillus* (20%) ja *Alternaria* (9%) kuuluvad hallitusseened. 4% hallitusseentest ei kuulunud ühegi eelnevalt mainitud perekonna hulka. Välisõhust võetud proovidest identifitseeritud hallitusseente perekondade jaotus oli vastavuses elamute siseõhust võetud proovidega.

#### Materjaliproovid seintest ning identifitseeritud hallitusseened perekondade lõikes

Uuringu käigus koguti materjaliproove välispiiretest (seinast) sügisel. Kogutud proovidest kasvatati välja

vaid üksikuid kolooniaid (min 6 PMÜ, max 14 PMÜ). Kolooniate perekondadesse jaotumine oli sarnane siseõhust kultiveeritud proovide perekondadesse jaotumiselega sügisel perioodil. 36% identifitseeritud hallitusseentest kuulus perekonda *Cladosporium*, 32% perekonda *Penicillium*, 25% perekonda *Aspergillus*, 2% perekonda *Alternaria*. 3% hallitusseentest ei kuulunud eelpoolmainitud perekondadesse.

#### Sisekliima näitajad (CO<sub>2</sub>, RH% ja temperatuur) elamute siseõhus ja kahel erineval kõrgusel piiretes

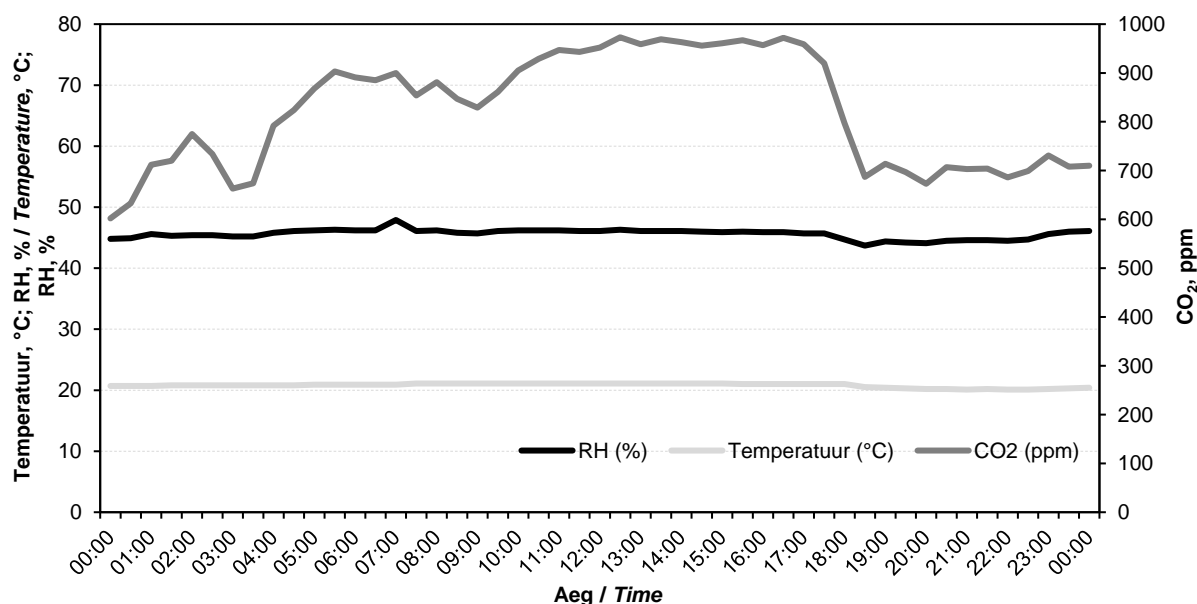
Kogu uuritud perioodi jooksul oli nii põhukui ka roopakidest seintega elamute süsihappegaasi keskmine tase (tabel 4) madalaimal tasemel suveperioodil (põhupakkidest seintega elamutes 607 ± 26 ppm, roopakidest seintega elamutes 568 ± 48 ppm). Kõige kõrgem oli süsihappegaasi keskmine tase põhupakkidest seintega elamutes kevadel (636 ± 26 ppm) ja roopakidest seintega elamutes sügisel (626 ± 65 ppm).

Ühte juhuslikult valitud päeva roopakidest seintega elamus kirjeldab joonis 2. Joonisel toodud päeva keskmine süsihappegaasi tase oli 822 ± 17 ppm. Vastavad väärtused olid madalamad öösel, maksimumväärtus (973 ppm) registreeriti päeval. Antud tuba oli kasutusel nii magamistoana kui ka laste mängutoana.

**Tabel 4.** Sisekliima keskmised näitajad (CO<sub>2</sub>, RH% ja temperatuur) põhukui ja roopakist seintega elamut magamistubades esitatuna koos standardveaga (±SE)

**Table 4.** Average parameters describing indoor climate (CO<sub>2</sub>, relative humidity to temperature) in the bedrooms of buildings with straw-bale and reed-bale walls shown as a mean with standard error (±SE)

Näitajad / Parameters	Talv / Winter		Kevad / Spring		Suvi / Summer		Sügis / Autumn	
	põhk straw	roopakk reed	põhk straw	roopakk reed	põhk straw	roopakk reed	põhk straw	roopakk reed
Süsihappegaas (CO <sub>2</sub> ), ppm Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> ), ppm	618 ± 28	574 ± 46	636 ± 26	573 ± 55	607 ± 26	568 ± 48	616 ± 27	626 ± 65
Temperatuur, °C / Temperature, °C	19,0 ± 0,5	19,0 ± 0,5	19,0 ± 0,4	19,3 ± 0,9	19,0 ± 1,3	20,6 ± 1,8	20,4 ± 0,6	20,7 ± 0,9
RH, %	36 ± 2	41 ± 2	36 ± 2	42 ± 2	36 ± 2	43 ± 2	39 ± 2	44 ± 3



**Joonis 2.** Süsihappegaasi taseme, temperatuuri ja õhuniiskuse (RH) dünaamika 24 tunni jooksul roopakidest seintega elumajas  
**Figure 2.** Dynamics of carbon dioxide, temperature and humidity (RH) over a 24-hour period in a reed-bale wall building

Keskmine õhutemperatuur (tabel 4) jäi uuritud elamute magamistubades 19–21 °C vahele. Vastavad näitajad olid ühtlased, olles talvel ja kevadel mõlema elamutüübi korral keskmiselt 19,0–19,3 °C. Suvel oli roopakist elamute siseõhutemperatuur keskmiselt 1,6 °C võrra kõrgem kui põhust seintega elamutes. Keskmine õhutemperatuur oli kõige kõrgem nii põhupakkidest seintega elamutes (20,4 ± 0,6 °C) kui ka roopakidest seintega elamutes (20,7 ± 0,9 °C) sügisel.

Uuritud magamistubades (tabel 4) jäi keskmine õhuniiskus 36–44% vahele, olles madalam põhupakkidest seintega elamute (36–39%) ja kõrgem roopakidest seintega elamute magamistubades (41–44%) Roopakidest seintega elamute puhul oli niiskusnäitaja kevadel 41 ± 2%, nii suvel kui ka sügisel oli see protsendi võrra eelnenud aastaaja väärtusest kõrgem (vastavalt 42 ± 2% ja 43 ± 2%).

Keskmine temperatuur piiretes 1,2 meetri kõrgusel (tabel 5) oli põhupakkidest seintega elamutes madalaim talvel (17,5 ± 1,3 °C), roopakist seintega elamutes aga kevadel (15,6 ± 1,5 °C). Kõrgeimad olid keskmised temperatuurinäitajad 1,2 meetri kõrgusel välispiirdes nii põhust (20,6 ± 0,8 °C) kui ka roopakist seintega elamutes suvel (19,3 ± 1,1 °C). Põhupakkidest seintega elamute puhul oli 1,2 m kõrgusel temperatuur välispiirdes (17,3–20,6 °C) kõrgem kui roopakidest seintega elamutes (15,6–19,3 °C). Erinevus oli palju suurem 0,2 m kõrgusel, kus põhupakkidest seintega elamute keskmine õhutemperatuur varieerus vastavalt 14,4–19,2 °C ja roopakidest seintega elamute temperatuur vastavalt 7,3–16,3 °C. 0,2 meetri kõrgusel välispiirdes oli keskmine temperatuur madalaim nii põhukui ka roopakidest seintega elamutes talvel (vastavalt 14,4 ± 2,4 °C ja 7,3 ± 2,5 °C). Kõrgeim oli keskmine temperatuur suveperioodil – põhupakkidest seintega elamutes 19,2 ± 1,0 °C ja roopakidest seintega elamutes 16,3 ± 1,6 °C.

RH% keskmised näitajad olid 1,2 meetri kõrgusel piiretes nii põhu – kui ka roopakidest seintega elamutes madalaimad talvel (vastavalt 33 ± 12% ja 33 ± 14%), kõrgeimad aga suveperioodil (põhupakkidest seintega elamutes 53 ± 7%, roopakidest seintega elamutes 57 ± 1%). Üldiselt on suhtelise õhuniiskuse väärtused sarnased – vastavalt 33–53% ja 33–57%.

Keskmine RH% oli 0,2 m kõrgusel piiretes madalaim talvel (vastavalt 38 ± 4% põhupakkidest seintega elamutes ja 45 ± 6% roopakidest seintega elamutes), kõrgeimad olid keskmised näitajad suveperioodil

(põhupakkidest seintega elamutes 54 ± 2%, roopakidest seintega elamutes 58 ± 1%). Roopakidest seintega elamutes on tendents, et suhteline õhuniiskus on 0,2 m kõrgusel kõrgem (42–58%), kui põhupakkidest seintega elamutes (38–54%).

### Välispiirde niiskuskoormus ja hallituse ohu hindamine

Temperatuuri ja niiskusenäitajaid piiretes iseloomustab joonis 3. Piirdes registreeriti ka kõrgemaid õhuniiskuse ja temperatuuri väärtusi kui siseõhus, kuid tõenäosus, et tingimused on hallitusseente kasvaks piirdes sobilikud, on väga madal.

Siseõhu niiskusliku hinnati nii talve- kui ka suveperioodil ühe konkreetse päeva põhjal. Roopakidest seintega elamute niiskusliku varieerus suvel 0,46 g m<sup>3</sup><sup>-1</sup> kuni 3,42 g m<sup>3</sup><sup>-1</sup> ja talvel 0,62 g m<sup>3</sup><sup>-1</sup> kuni 2,73 g m<sup>3</sup><sup>-1</sup>. Põhupakkidest seintega elamute niiskusliku varieerus suvel 2,1 g m<sup>3</sup><sup>-1</sup> kuni 1,99 g m<sup>3</sup><sup>-1</sup>, talvel – 0,06 g m<sup>3</sup><sup>-1</sup> kuni 1,43 g m<sup>3</sup><sup>-1</sup>. Negatiivne oli niiskusliku päevasel ajal, mil elanikud ruumides ei viibinud. Tulenevalt Hukka ja Viitaneni (1999) poolt loodud mudeliga võrdlemisest, oli hallituse oht kõikides uuritud elamutes madal.

### Hoonete kompleksne hindamine

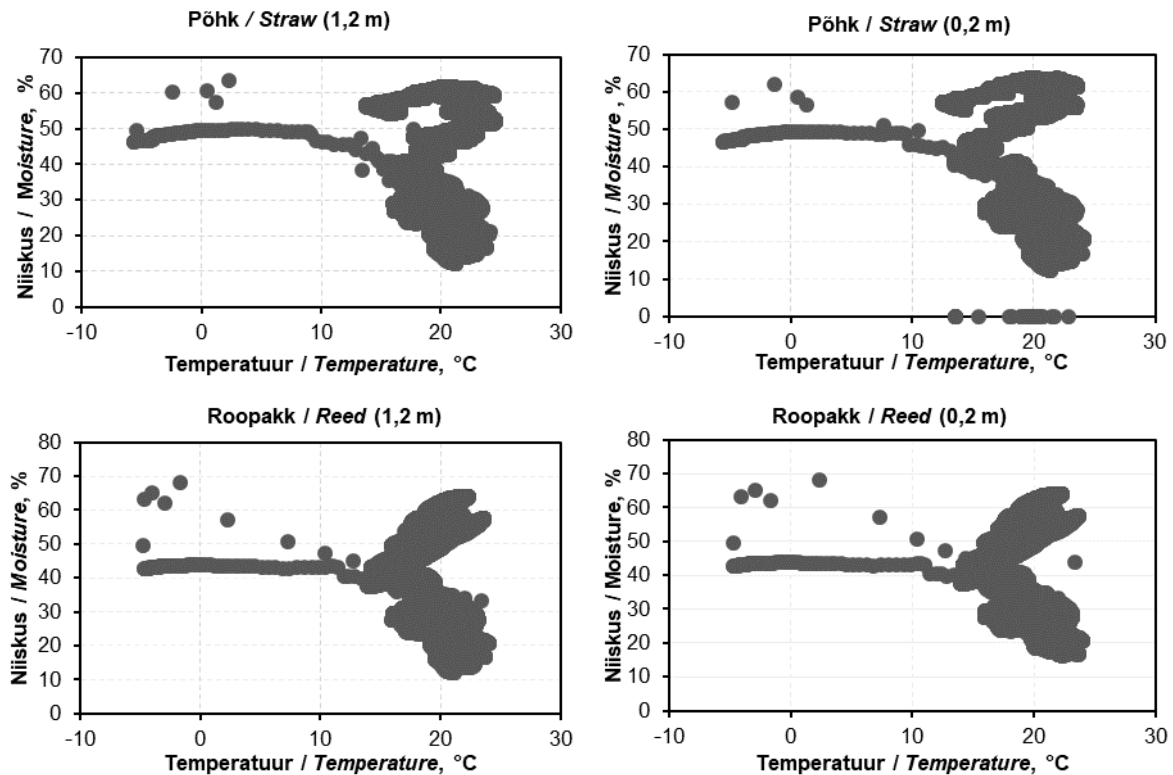
Töös uuriti elamute siseõhu kvaliteeti komplekselt, kogudes paralleelselt sisekliima parameetrite (õhutemperatuur, RH, CO<sub>2</sub>) ning mikrobioloogia andmeid (pesa moodustavate ühikute arv ja taksonoomiline koosseis) nii õhust kui ka välispiirde (seinte) materjalist. Interdistsiplinaarses uuringus vaadati komplekselt põhu- ja roopakidest seintega elamute sisekliimat, kasutades selleks andurandmesalvesteid, õhu- ja materjaliproove. Kaks andurandmesalvestit paiknesid piirdes ligikaudu 20 cm sügavusel – üks 0,2 m kõrgusel põrandast, et tuvastada võimalikke probleemkohti sõlme lähedal (kapillaartõus, vundamenti ehitusvead, võimalikud külmasillad) ja teine 1,2 m kõrgusel põrandast stabiilses seinas.

Tuginedes andurandmesalvestitega kogutud teabele ning õhu- ja materjaliproovide tulemustele leiti, et nii põhust kui ka pilliroost elamute seintes on hallituseoht väike. Roopakidest seintega elamute puhul väärrib märkimist erakordselt madal temperatuur (7,3 ± 2,5 °C) piirdes 0,2 m kõrgusel põrandast talvisel perioodil, mis viitab roopakidete madalale tihedusele. Korstnaefekti tõttu on alumises sõlmes sissetõmme ning niiskustase ei ole kõrge.

**Tabel 5.** Keskmine õhutemperatuur ja õhuniiskuse (RH) piiretes 1,2 ja 0,2 m kõrgusel põhu – ja roopakist elumajade magamistubades esitatuna koos standardveaga (±SE)

**Table 5.** Average air temperature and humidity (RH) within the ranges of 1.2 and 0.2 m for straw bale and reed buildings, shown with standard error (±SE)

Näitajad / Parameters	Talv / Winter		Kevad / Spring		Suvi / Summer		Sügis / Autumn	
	põhk straw	roopakk reed	põhk straw	roopakk reed	põhk straw	roopakk reed	põhk straw	roopakk reed
Temperatuur (°C) 1,2 m kõrgusel Temperature (°C) at 1.2 m	17,3 ± 2,2	16,3 ± 4,6	17,5 ± 1,3	15,6 ± 1,5	20,6 ± 0,8	19,3 ± 1,1	18,2 ± 1,2	17,0 ± 1,8
Temperatuur (°C) 0,2 m kõrgusel Temperature (°C) at 0.2 m	14,4 ± 2,4	7,3 ± 2,5	15,7 ± 1,0	11,3 ± 3,7	19,2 ± 1,0	16,3 ± 1,6	16,7 ± 1,5	13,9 ± 2,6
RH (%) 1,2 m kõrgusel RH (%) at 1.2 m	33 ± 12	33 ± 14	41 ± 7	47 ± 2	53 ± 7	57 ± 1	41 ± 4	45 ± 4
RH (%) 0,2 m kõrgusel RH (%) at 0.2 m	38 ± 4	45 ± 6	42 ± 3	47 ± 1	54 ± 2	58 ± 1	42 ± 2	51 ± 2



**Joonis 3.** Temperatuur (°C) ja niiskunäitaja (%) piires 1,2 ja 0,2 meetri kõrgusel nii põhu- ja roopakkidest elamute välisseintes  
**Figure 3.** Temperature (°C) and humidity (%) in outer boarders at 1.2 and 0.2 meters in buildings with straw- and reed-bale walls

### Arutelu

Ehitussektor on suurim ressursside tarbija kogu maailmas, mis aitab olulisel määral kaasa kliimamuutusele (Dutil jt, 2011; Iacovidou, Purnell, 2016). Kasvav nõudlus ehitiste ja infrastruktuuri järele suurendab nii materjalide kaevandamist kui ka emissioone (Krausmann jt, 2017). Süsiniku emisioonide vähendamiseks kogu olelustuski jooksul on võimalik kasutada leevendusmeetmeid nii projekteerimisel kui ka ehitamisel (Pomponi, Moncaster, 2016), kasutada saab aga ka süsinikneutraalseid materjale (Chel, Kaushik, 2018). Looduslikel materjalidel on keskkonnale väike mõju, samuti pakuvad sellised materjalid elanikele/kasutajatele tervislikku elukeskkonda (Brojan jt, 2013).

Põhk ja pilliroog on materjalid, mis kasvamise käigus kasutavad fotosünteesiprotsessis süsihappegaasi ning nende kasutamine ehituses on kasvutrendis. Kuna tegemist on biolagunevate materjalidega, on oluline olla informeeritud selliste materjalide ehitamisel kasutamisega kaasas käivast mikroobipopulatsioonist ja selle võimalikust ohtlikkusest nii siseõhule kui ka piirdearanditele.

Mikroorganismid, kes elavad suure niiskustasemega keskkonnas, vajavad oma elutegevuseks sobivat temperatuuri. Lawrence jt (2009) toovad välja, et sobiv temperatuurivahemik on 20–70 °C, madalam kui 10 °C temperatuur aga pärsib mikroorganismide elutegevust. Köetavates ruumides peab inimese pikemaajalisel ruumis viibimisel temperatuur olema vähemalt 18 °C, optimaalne, luues inimesele soojatunde ning aidates kaasa tervisliku ja nõuetele vastava sisekliima tekkimisele ja püsimisele (Kalamees jt, 2011). Keskmise

siseõhu temperatuur jäi mõõteperioodil 19–21 °C vahele vastates standardi EVS-EN 16798-1:2019 (EVS-EN 16798-1:2019) alusel sisekliimaklassile III. Suveperioodil, mil temperatuurid ja niiskustase on hoonetes kõrgem, on ebasoodsate olude kokkulangemisel (kõrge temperatuur, piisav suhteline niiskus (üle 75%)) võimalik mikroobne kasv (Hukka, Viitanen, 1999; Johansson jt, 2012). Otseselt materjali hallitus ei kahjusta, kuid see viitab liiga kõrgele niiskustasemele konstruktsioonis ning võimalikele sellest põhjustatud riskidele (kõdunemine) (Lelumees, 2016).

Lisaks sobivatele temperatuuridele on mikroorganismide kasvu seisukohalt oluline roll ka ruumi õhuniiskusel ning toitainetel (Rajasekar, Balasubramanian, 2011). Eluruumide kohta kehtiva määruse kohaselt võiks optimaalne niiskus olla 40–60% (Arundel jt, 1986). Kriitiline õhuniiskuse tase mikrobioloogilise kasvu seisukohalt on 75–95%, sõltudes nii temperatuurist kui ka ehitusmaterjalist (Johansson jt, 2012). Hukka ja Viitanen (1999) toovad oma hallituse kasvu iseloomustavas mudelis välja keskkonnatingimuste ajalise kestuse, mis on vajalik mikrobioloogilise kasvu aluseks. Uuritud elamutes jäi õhuniiskuse 36–44% piiridesse ja temperatuur 19–21 °C vahele. Süsihappegaasi taseme näitajad jäid soovitatud piiridesse (ühes liitris ruumiõhus on lubatud CO<sub>2</sub> kontsentratsioon kuni 1000 ppm (RT I, 2011)) kuuludes kõikide uuritud magamistubade puhul ISO standardi EVS-EN 16798-1:2019 (EVS-EN 16798-1:2019) alusel sisekliima klassi II (≤800ppm). Käesoleva töö raames uuritud elumajade magamistubade puhul on õhu niiskuse ja temperatuurinäitajad liiga madalad, et eeldada hallitussente kasvu.

Roopakkidest seintega elamutes olid pesa moodustavate ühikute (PMÜ) väärtused kõrgemad kui põhupakkidest seintega elamutes ning see võib viidata võimalikule mikrobioloogilisele kasvule ülemise sõlme läheduses.

Õhu suhteline niiskus mõjutab nii hoonepiirete niiskusrežiimi kui ka hoone sisekliimat (Kalamees jt, 2011). Kui niiskuskoormus on suur, võib see halvendada nii sisekliimat kui ka põhjustada niiskusprobleeme piirdetarinditele (Kalamees jt, 2010). Siseõhu niiskuslisa oli üsna madal, olles kõrgem roopakkidest seintega elamute puhul ( $0,46 \text{ g m}^{-3}$  kuni  $3,42 \text{ g m}^{-3}$  suvel ja talvel  $0,62 \text{ g m}^{-3}$  kuni  $2,73 \text{ g m}^{-3}$ ) ning kuuludes standardi EVS-EN ISO 13788 alusel II klassi (EVS-EN ISO 13788:2012). Põhupakkidest seintega elamud kuulusid oma niiskuslisa poolest standardi EVS-EN ISO 13788 alusel I klassi (EVS-EN ISO 13788:2012). Põhupakkidest seintega elamute puhul oli niiskuslisa negatiivne talveperioodil tööpäevadel päevasel ajal, mil elanikud kodus ei viibinud.

Talveperioodil oli roopakkidest seintega elamute puhul keskmine temperatuur  $0,2$  meetri kõrgusel vaid  $7,3 \pm 2,5$  °C. Sellises olukorras eeldame, et suhteline õhuniiskus on kõrge, kuid antud olukorras oli see keskmiselt  $41 \pm 2\%$ . See viitab võimalikule hõredusele ehitussõlmede puhul, ning tänu korstnaefektile toimub selles piirkonnas külma õhu sissevool. Kuna piirdes teostati mõõtmisi ainult kahel kõrgusel ( $0,2$  ja  $1,2$  m), siis korstnaefekti tõttu on oht, et piirde ülemises servas on tõenäoline ülerõhu tõttu (sooja niiske) õhu väljavool, mis on otsene oht hallituse tekkeks. Antud leid on murettekitav, sest piirdetarind on ohustatud niiskumisest ja roopakk sobivate tingimuste korral ka mikrobioloogilisest kasvust. Linnaseagarile (MEA) siseõhust võetud proovid näitavad kõrgemaid väärtusi kõikide aastaegade lõikes, võrreldes välisõhust võetud proovidega.

Erinevatel riikidel on kasutusel erinevad standardid pesa moodustavate ühikute lubatud tasemete suhtes, kuid ühtne rahvusvaheline standard puudub (Jyotshna, Helmut, 2011). WHO ekspertrühma uurimuses leiti, et pesa moodustavate ühikute kogus sisetingimustes ei tohiks ületada  $1000 \text{ PMÜ m}^{-3}$  (Nevalainen, Morawaska, 2009). Eestis puuduvad hallitusseentele sisekeskkonnas piirnõrmi. Soovituslikud piirnõrmi on kehtestatud Soomes ning seal tuuakse välja, et talveperioodil on soovituslik kuni  $500 \text{ PMÜ m}^{-3}$ , suveperioodil kuni  $2500 \text{ PMÜ m}^{-3}$  (Kosteusvauriõot työpaikoilla, 2009). Antud uuringu puhul jäid siseõhus pesa moodustavate ühikute kogu uuringuperioodi hõlmavad keskmistatud kontsentratsioonid põhust seintega elamute puhul tasemele  $323 \pm 80 \text{ PMÜ m}^{-3}$  ning roopakkidest seintega elamute puhul tasemele  $576 \pm 94 \text{ PMÜ m}^{-3}$ . Ühest roopakkidest seintega elamust 2015. aasta suvel võetud proovid ( $1060 \pm 8 \text{ PMÜ m}^{-3}$ ) ületasid sisetingimustesse sobivaid WHO ekspertrühma poolt toodud soovituslikku kontsentratsiooni ( $1000 \text{ PMÜ m}^{-3}$ ), kuid jäid alla Soome soovituslike piirnõrmi (kuni  $2500 \text{ PMÜ m}^{-3}$ ).

Hallitusseente kontsentratsioonid olid kõikidel aasta-aegadel siseõhus kõrgemad kui välisõhus. Elamute siseõhust võetud proovidelt identifitseeritud hallitusseente perekonnad ei erinenud välisõhust võetud proovidelt identifitseeritud seeneperekondadest. Varasemad uuringud on näidanud, et välisõhust kultiveeritavad seeneliigid on kultiveeritavad ka siseõhust (Hoseini jt, 2012; Kalawasinska jt, 2012; Raamets jt, 2019). Piiretes olid kontsentratsioonid mõõdetud piirkondades väga madalad ning hallitusseente perekondlik jaotus oli sarnane sise- ja välisõhust identifitseeritud perekondadega. Olulisi erinevusi hallitusseente perekondlikus ja protsentuaalses jaotuses ei leitud, sügisesed kontsentratsioonid olid kõrgemad kui talvised kontsentratsioonid (Hameed jt, 2012). Põhjuseks on hallitusseente kasvuks ja arenguks sobiv temperatuuri ja õhuniiskuse tase, samuti hulgaliselt taimset materjali, mis on substraadiks (Awad jt, 2018). Sarnast dünaamikat siseõhuproovide puhul aastaegade lõikes, nagu leiti selle uuringu tulemusena, on leitud ka varasemates hoone sisekliimat puudutavates uuringutes (Medrela-Kuder, 2003; Haas jt, 2007; Frankel jt, 2012).

Kompleksne lähenemine põhu- ja roopakkidest seintega elamute sisekliima uurimisele aitas tuvastada probleemse koha roopakkidest seina konstruktsioonis, mis on ilmselt tingitud ebapiisavast roopakkide tihedusest. Kahtluse kontrollimiseks on vajalik teostada edasised uuringud ning andur-andmesalvesti tuleks paigaldada ka piirdesse lae (ülemise sõlme) lähedale.

## Järeldused

Töös uuriti ja mõõtmised viidi läbi põhu- ja roopakkidest elumajades, mis olid vastava eriala spetsialistide poolt projekteeritud ja ehitatud. Lahendusi töös lähemalt ei analüüsitud, kuid näiteks võib tuua nii laiad räästid, mis kaitsevad seinu vihma eest, kui ka hästi isoleeritud ja üsna kõrge sokliosia. Üheski hoones ei tuvastatud niiskuskahjustusi ega nähtavat hallituse kasvu. Kõiki elamuid uuriti komplekselt. Sisekliima andmetest nähtub, et õhutemperatuur oli küll pigem mõnevõrra madalam, kui eluruumides tavaliselt ( $21$  °C). Suhteline õhuniiskus oli optimaalses vahemikus ning silma ei registreeritud ka väga madalaid temperatuuriväärtusi, mis on talvisel ajal tavaline probleem keskküttega ja hästiventileeritud hoonetes. CO<sub>2</sub> kontsentratsioon ei ületanud soovituslikku piirväärtust.

Siseõhu niiskuslisa oli väike, siseõhust ega piiretest ei leitud hallituse arenguks sobivaid tingimusi vastavalt hallitusindeksile.

Kõrgemad pesa moodustavate ühikute (PMÜ) väärtused registreeriti mõõtmisperioodi jooksul roopakkidest seintega elamutes. Põhupakkidest seintega elamutes olid vastavad väärtused madalamad. Sesoonsed muutused esinesid mõlemal juhul. Läbiviidud uuringute põhjal võib öelda, et põhu- ja roopakkidest seintega elamute siseõhus esineb rohkem kolooniaid võrreldes välisõhuga. Uuringu käigus ei tuvastatud visuaalsel vaatlusel hallituse koldeid.



Töö käigus määrati nelja perekonda kuuluvaid hallitusseeni (*Alternaria*, *Aspergillus*, *Penicillium* ja *Cladosporium*), mis on leivnuimad teraviljal leiduvad hallitusseente perekonnad. Eelmainitud perekondadesse kuuluvad hallitusseened võivad kujutada endast riski inimestele (allergia, krooniline nohu, kõha, hingamisteede haigused).

Kompleksne lähenemine võimaldas tuvastada ühe probleemse koha roopakkidest hoonete puhul. Nendes hoonetes oli ka hallitusseente hulk mõnevaõrra suurem. Vastavat lähenemist võib soovitada ka teiste analoogsete uuringu puhul, mis võiks anda aluse selle meetodiks arendamiseks.

Uuritavate elamute sisekliima hindamisel saadud tulemused lubavad järeldada, et roo- või põhupakkides seintega ehitatud elamu on Eesti kliimaatilistesse tingimustesse sobiv ehitus, mis asjatundliku planeerimise, ehituseks sobiva materjali kasutamise ja kvaliteetse ehitustegevuse tulemusena on tervislik ja keskkonnasõbralik eluase. Kindlasti tuleks läbi viia vastavad uuringud hoonetes, kus on mingil põhjusel niiskuskahjustused tekkinud. Kuivõrd niiskuskahjustusi hoonetes ikka esineb kasvõi veevariide tõttu, siis on tarvis välja selgitada, milline on olukord ja töötada välja taastamiseks vajalikud meetmed.

#### Tänuavaldused

Autorid tänavad põhu- ja roopakist seintega elamute omanikke, kes lubasid oma eluruumides vajalikke mõõtmisi teostada.

#### Huvide konflikt / *Conflict of interest*

Autorid kinnitavad artikliga seotud huvide konflikti puudumist.

*The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this paper.*

#### Autorite panus / *Author contributions*

JR, AR – uuringu kava ja planeerimine / *study conception and design*;

JR – Proovide kogumine ja analüüs / *acquisition of data*;

JR, AR, MI, LN, KM – andmete analüüs ja interpretatsioon / *analysis and interpretation of data*;

JR, AR, MI, LN, KM – käsikirja koostamine / *drafting of manuscript*;

AR, MI, LN – käsikirja ülevaatamine ja lõplik heaks kiitmine / *critical revision and approve the final manuscript*.

## Indoor air quality in straw bale and reed buildings

Jane Raamets, Aime Ruus, Mari Ivask, Lembit Nei, Karin Muoni

Tallinn University of Technology, School of Engineering, Tartu College, Puiestee 78, 51008 Tartu Estonia

### Summary

Straw and reed buildings are item or synonyms for "ecological building" from healthy, reusable and renewable materials and energy efficient buildings. On the other hand there are legends about mould and asthma problems as common problem in straw and reed buildings.

To describe the indoor environment and building boarders (wall) long term studies (over 2 years) were carried out in the bedrooms of eight buildings (4 straw bale and 4 reed houses). This interdisciplinary study focuses to building as whole system. Air temperature, relative humidity (RH) and CO<sub>2</sub> concentration, temperature and RH inside the boarders (walls) at two heights (0.2 and 1.2 m) from floor level were measured. Holes were closed with plaster. To describe the microbiology in buildings and find out microbiological problems two kinds of tests were performed. Microbiological samples from indoor air and outdoor air (reference value) were collected in every season with air samplers. Residents were asked not to ventilate the houses at least 6h prior to measurements. Sampling media and procedure was designed according to ISO standard 16000-18: Detection and enumeration of moulds – Sampling by impaction. Malt Extract Agar (MEA) and 18% Dichloran glycerol agar (DG18) media were used. The sample plates were incubated at 25 °C for seven days, colony forming units (CFU) were counted and fungi were determined morphologically and microscopically following staining with lactophenol blue. For the identification to the genus level standardized identification keys were used.

Microbiological samples from building materials mounted in boarders (walls) were collected at two heights (0.2 and 1.2 m) by hand at the same points, where the holes for the temperature and RH loggers were made. Malt Extract Agar (MEA) and 18% Dichloran glycerol agar (DG18) media were used for direct plating. The sample plates were incubated at 32 °C for 72 hours, colony forming units (CFU) were counted and fungi were determined morphologically and microscopically following staining with lactophenol blue. For the identification to the genus level standardized identification keys were used.

Higher values of Colony Forming Units (CFU) were recorded during the measurement period in reed houses. The values were lower in straw houses. Seasonal changes occurred in both cases. Studies have shown that there are more colonies in the indoor air of straw and reed buildings compared to outdoor air. No mold growth was identified during this study. A complex approach to indoor climate of straw and reed habitats helped to identify a problematic site in reed buildings,

probably due to inadequate density of reed bales. Further investigations are needed to verify the suspicion and the data recorder should also be installed in the enclosure near the ceiling.

In the course of the work, four families of molds (*Alternaria*, *Aspergillus*, *Penicillium* and *Cladosporium*) were identified that may pose a risk to human health (allergy, chronic rhinitis, cough, respiratory disease). The results of the indoor climate assessment of the buildings under investigation allow us to conclude that a house made of reed or straw is a building suitable for Estonian climatic conditions, which, as a result of expert planning, use of building materials and quality construction, is a healthy and environmentally friendly housing solution.

### Kasutatud kirjandus

- Al-Jumeily, D., Hashim, K., Alkaddar, R., Al-Tufaily, M., Lunn, J. 2018. Sustainable and Environmental Friendly Ancient Reed Houses (Inspired by the Past to Motivate the Future). – In: 11<sup>th</sup> International Conference on Developments in E Systems Engineering. DOI: 10.1109/dese.2018.00032.
- Arundel, A.V., Sterling, E.M., Biggin, J.H., Sterling, T.D. 1986. Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. – *Environ. Health Perspect.* 65:351–361. DOI:10.1289/ehp.8665351.
- Awad, A.H., Saeed, Y., Hassan, Y., Fawzy, Y. Osman, M. 2018. Air microbial quality in certain public buildings, Egypt: a comparative study. – *Atmos. Pollut. Res.*, 9:617–626. DOI: 10.1016/j.apr.2017.12.014.
- Barreca, F., Gabarron, A.M., Yepes, J.A.F., Pérez, J.J.P. 2019. Innovative use of giant reed and cork residues for panels of buildings in Mediterranean area. – *Resour. Conserv. Recy.*, 140:259–266. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.10.005.
- Bergey, D.H., Holt, J.G. (Eds.). 2000. *Bergey's manual of determinative bacteriology*. – Philadelphia : Lippincott Williams & Wilkins, USA. 787 p.
- Bernasconi, C., Rodolfi, M., Picco, A.M., Grisoli, P., Dacarro, C., Rembges, D. 2010. Pyrogenic activity of air to characterize bioaerosol exposure in public buildings: a pilot study. – *Letters in Appl. Microbiol.*, 50(6):571–577. DOI: 10.1111/j.1472-765X.2010.02831.x.
- Brischke, C., Hanske, M. 2016. Durability of untreated and thermally modified reed (*Phragmites australis*) against brown, white and soft rot causing fungi. – *Ind. Crops and Prod.*, 91:49–55. DOI: 10.1016/j.indcrop.2016.06.031.
- Brojan, L., Petric, A., Clouston, P.L. 2013. Comparative study of brick and straw bale wall systems from environmental, economic and energy perspectives. – *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, 8:980–926. DOI: 10.1016/j.applsci.2013.8.008.
- Canha, N., Lage, J., Coutinho, J.T., Alves, C., Almeida, S.M. 2019. Comparison of indoor air quality during sleep in smokers and non-smokers' bedrooms: A preliminary study. – *Environ. Pol.*, 249:248–256. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.03.021.
- Chel, A., Kaushik, G. 2018. Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. – *Alex. Eng. J.*, 57(2):655–669. DOI: 10.1016/j.aej.2017.02.027.
- Domsch, K.H., Gams, W., Anderson, T.H. 1980. *Compendium of Soil Fungi*, Vol. 1. – Academic Press, London. 860 p.
- Dutil, Y., Rouse, D., Quesada, G. 2011. Sustainable buildings: An ever evolving target. – *Sust.*, 3:443–464. DOI: 10.3390/su3020443.
- Frankel, M., Bekö, G., Timm, M., Gustavsen, S., Hansen, E.W., Madsen, A.M. 2012. Seasonal variations of indoor microbial exposures and their relation to temperature, relative humidity, and air exchange rate. – *App. Environ. Microbiol.* 78(23):8289–8297. DOI: 10.1128/AEM.02069-12.
- Grant, C., Hunter, C., Flannigan, B., Bravery, A. 1989. The moisture requirements of moulds isolated from domestic dwellings. – *Int. Biodeter.*, 25(4):259–284.
- Gravesen, S., Frisvad, J.C., Samson, R.A., 1994. *Microfungi*. – Munksgaard, København, Denmark 1994, 168p. (In Danish)
- Haas, D., Habib, J., Galler, H., Buzina, W., Schlacher, R., Marth, E., Reinthaler, F. 2007. Assessment of indoor air in Austrian apartments with and without visible mold growth. – *Atmos. Environ.*, 41(25):5192–5201. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.07.062.
- Hameed, A.A.A., Khoder, M.I., Ibrahim, Y.H., Saeed, Y., Osman, M.E., Ghanem, S. 2012. Study on some factors affecting survivability of airborne fungi. – *Sci. Total Environ.*, 414:696–700. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.10.042.
- Henderson, K. 2007. Achieving legitimacy: visual discourses in engineering design and green building code development. – *Build. Res. Inf.*, 35(1):6–17. DOI: 10.1080/09613210600979780.
- Hernberg, S., Sripaiboonkij, P., Quansah, R., Jaakkola, J.J., Jaakkola, M.S. 2014. Indoor molds and lung function in healthy adults. – *Respir Med.*, 108(5):677–684. DOI: 10.1016/j.rmed.2014.03.004
- Holzhueter, K., Itonaga, K. 2010. The Hygrothermal Environment and Potential for Mold Growth within a Straw Bale Wall. – *J. Asian. Archit. Build. Eng.*, 9(2):495–499. DOI: 10.3130/jaabe.9.495.
- Holzhueter, K., Itonaga, K. 2017. An Evaluation of WUFI-Bio to Predict Mold Growth in Straw Bale Walls in Japan. – *J. Asian. Archit. Build. Eng.*, 16(2):357–362. DOI: 10.3130/jaabe.16.357.
- Horr, Y.A., Arif, M., Katafygiotou, M., Mazroei, A., Kaushik, A., Elsarrag, E. 2016. Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. – *Int. J. Sustain. Built. Environ.*, 5(1):1–11. DOI: 10.1016/j.ijbsbe.2016.03.006.
- Hoseini, M., Jabbari, H., Naddafi, R., Nabizadeh, M., Rahbar, M., Yunesian, M., Jaafari, J. 2012. Concentration and distribution characteristics of

- airborne fungi in indoor and outdoor air of Tehran subway stations. – *Aerobiol.*, 29:355–363. DOI: 10.1007/s10453-012-9285-8.
- Hukka, A., Viitanen, H. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. – *Wood Sci. Technol.*, 33:475–485. DOI: 10.1007/s002260050131.
- Iacovidou, E., Purnell, P. 2016. Mining the physical infrastructure: Opportunities, barriers and interventions in promoting structural components reuse. – *Sci. Total Environ.*, 557:791–807. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.098.
- EVS-EN 16798-1:2019. Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast. – Tallinn: Eesti Standardikeskus. (In Estonian)
- EVS-ISO 16000-17:2012. Siseõhk. Osa 17: Hallitussente avastamine ja loendamine. Külvipõhine meetod. – Tallinn: Eesti Standardikeskus. (In Estonian)
- ISO 16000-18:2011. Detection and enumeration of moulds -- Sampling by impaction. – Bruxelles: European committee for Standardisation.
- EVS-EN ISO 13788:2012. Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus. Kriitilise pinnaniiskuse ja elemendisese kondenseerumise vältimine. Arvutusmeetodid. – Tallinn: Eesti Standardikeskus. (In Estonian)
- Johansson, P., Ekstrand-Tobin, A., Svensson, T., Bok, G. 2012. Laboratory Study to Determine the Critical Moisture Level for Mould Growth on Building Materials. – *Int. Biodeter. Biodegr.*, 73:23–32. DOI: 10.1016/j.ibiod.2012.05.014.
- Jyotshna M, Helmut B. 2011. Bioaerosols in Indoor Environment - A Review with Special Reference to Residential and Occupational Locations. – *The Open Envir. & Biol. Mon. J.*, 4:83–96. DOI: 10.2174/1875040001104010083.
- Kalamees, T., Alev, Ü., Arumägi, E., Ilomets, S., Just, A., Kallavus, U. 2011. Maaelamute sisekliima, ehitusfüüsika ja energisääst I. – <https://kredex.ee/sites/default/files/2019-03/Maaelamute%20sisekliima,%20ehitusf%20c3%bc%20c3%bc%20sika%20ja%20energias%20a4%20a4st.pdf>. Viimati külastatud 04.02.2020. (In Estonian)
- Kalamees, T., Kõiv, T.-A., Liias, R., Õiger, K., Kallavus, U., Mikli, L., Ilomets, S., Kuusk, K., Maivel, M., Mikola, A., Klõšeiko, P., Agasild, T., Arumägi, E., Liho, E., Ojang, T., Tuisk, T., Raado, L.-M., Jõesaar, T. 2010. Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga. – [https://www.mkm.ee/sites/default/files/suurpaneelamute\\_uuringu\\_loppraport\\_trukk.pdf](https://www.mkm.ee/sites/default/files/suurpaneelamute_uuringu_loppraport_trukk.pdf). Viimati külastatud 05.02.2020. (In Estonian)
- Kalawasinska, A., Burkowska, A., Wilk, I. 2012. Microbial air contamination in indoor environment of a University library. – *Ann. Agric. Environ. Med.*, 19:25–29.
- Katsoyiannis, A., Cincinelli, A. 2019. 'Cocktails and dreams': the indoor air quality that people are exposed to while sleeping. – *J. Environ. Sci. Health.*, 8:6–9. DOI: 10.1016/j.coesh.2018.12.005.
- Kilch, M.A. 1988. A Laboratory Guide to Common Aspergillus Species and their Teleomorphs. – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Division of Food Processing, North Ryde, Australia. 116 p.
- King, B. 2006. Design of Straw Bale Buildings. – The State of the Art, Green Building Press, San Rafael. 296 p.
- Krausmann, F., Wiedenhofer, D., Lauk, C., Haas, W., Tanikawa, H., Fishman, T., Miatto, A., Schandl, H., Haberl, H. 2017. Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20<sup>th</sup> Century and require half of annual resource use. – *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 114(8):1880–1885. DOI: 10.1073/pnas.1613773114.
- Kosteusvauriot työpaikoilla. 2009. Kosteusvauriotyöryhmän muistio. Sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskuksen selvityksiä: 18. – Yliopistopaino, Helsinki. 82 p. (In Finnish)
- Laborel-Préneron, A., Ouédraogo, K., Simons, A., Labat, M., Bertron, A., Magniont, C., Aubert, J.-E. 2018. Laboratory test to assess sensitivity of bio-based earth materials to fungal growth. – *Build. Environ.*, 142:11–21. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.06.003.
- Larone, D.H. 2002. Medically Important Fungi. A Guide to Identification, 4<sup>th</sup> ed. ASM Press, American Society for Microbiology, Washington, 409 p.
- Lawrence, M., Heath, A., Walker, P. 2009. Determining moisture levels in straw bale construction. – *Const. Build. Mat.*, 23(8):2763–2768. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.03.011.
- Lelumees, M. 2016. Ehitusniiskuse mõju lisaosojustamise moodulelementide niiskustehnilisele toimivusele. – *Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, Eesti, 10/06/2016, 117 lk.* (In Estonian)
- Lõiveke, H. 2008. Hallitussened ja mükotoksiinid teraviljas. – *Nädaline*, 124:9. (In Estonian)
- Lõiveke, H., Ilumäe, E., Akk, E. 2008. Teravilja mikrobioloogiast ja ohutusest. – *Agraarteadus*, 19(2):38–45. (In Estonian)
- Medrela-Kuder, E. 2003. Seasonal variations in the occurrence of culturable airborne fungi in outdoor and indoor air in Craców. – *Int. Biodeter. Biodegr.*, 52(4):203–205. DOI: 10.1016/s0964-8305(02)00167-1
- Milutiené, E., Staniškis, J.K., Kručius, A. 2012. Increase in buildings sustainability by using renewable materials and energy. – *Clean. Technol. Envir.*, 14(6):1075–1084. DOI: 10.1007/s10098-012-0505-2.
- Nevalainen, A., Morawaska, L. (Eds.). 2009. Biological Agents in Indoor Environments. Assessment of Health Risks. – Work conducted by a

- WHO Expert Group between 2000–2003. WHO, QUT.
- Nielsen, K., Holm, G., Uttrup, L., Nielsen, P. 2004. Mould growth on building materials under low water activities. Influence of humidity and temperature on fungal growth and secondary metabolism. – *Int. Biodeter. Biodegr.* 54(4):325–336. DOI: 10.1016/j.ibiod.2004.05.002.
- Pomponi, F., Moncaster, A. 2016. Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment – What does the evidence say? – *J. Environ. Manage.*, 181:687–700. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.08.036
- Portnoy, J.M., Kwak, K., Dowling, P., Vanosdol, T., Barnes, C. 2005. Health effects of indoor fungi. – *Ann. Allergy Asthma Immunol.*, 94(3):313–320. DOI: 10.1016/s1081-1206(10)60982-9.
- Raamets, J., Kutti, S., Vettik, A., Ilustrumm, K., Rist, T., Ivask, M. 2016. The antimicrobial effect of three different chemicals for the treatment of straw bales used in housing projects. – *Proceedings of the International Conference on Sustainable Housing Planning, Management and Usability: Sustainable Housing 2016*, Porto, Portugal 16-18.11.2016. Eds. R. Amoêda, C. Pinheiro. Green Lines Institute for Sustainable Development, 537–545.
- Raamets, J., Kutti, S., Ruus, A., Ivask, M. 2017. Assessment of Indoor Air in Estonian Straw Bale and Reed Houses. – *WIT Trans. Ecol. Envir.*, 211:193–196. DOI: 10.2495/AIR170191.
- Raamets, J., Ruus, A., Ivask, M. 2019. Assessment of indoor air quality and hygrothermal conditions of boarders during autumn, winter and spring in two of Estonian straw-bale houses. – *Cold Climate HVAC 2018: Sustainable Buildings in Cold Climates: Cold Climate HVAC 2018 The 9<sup>th</sup> International Cold Climate Conference*, Sustainable new and renovated buildings in cold climates, Kiruna, Sweden 12-15, March 2018. Eds. D. Johansson, H. Bagge, Å. Wahlström. Springer, 815–823. (Springer Proceedings in Energy) DOI: 10.1007/978-3-030-00662-4\_68.
- Rajasekar, A., Balasubramanian, R. 2011. Assessment of airborne bacteria and fungi in food courts. – *Build. Environ.*, 46(10):2081–2087. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.04.021.
- Riigi Ilmateenistus. 2020. Ilmaülevaated. – <http://www.ilmateenistus.ee/kliima/ulevaated/>. Viimati külastatud 30.01.2020. (In Estonian)
- RT I. 11.10.2011. Tervisekaitseõuded koolieelse lasteasutuse maa-alale, hoonetele, ruumidele, sisustusele, sisekliimale ja korrashoiule, Vabariigi Valitsuse määrus nr. 131. – <https://www.riigiteataja.ee/akt/111102011003>. Viimati külastatud 30.01.2020. (In Estonian)
- Samson, R.A., Hoeckstra, E.S., Frisvad, J.C., Filtenborg, O. 1996. *Introduction to Food-Borne Fungi*, 5<sup>th</sup> ed. – Centraalbureau voor Schimmelcultures Baarn, Delft, Wageningen, Ponsen & Looyen. 322 p.
- Shon, C.-S., Mukashev, T., Lee, D., Zhang, D., Kim, J. 2019. Can Common Reed Fiber Become an Effective Construction Material? Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Mortar Mixture Containing Common Reed Fiber. – *Sustain.*, 11(3):903. DOI: 10.3390/su11030903.
- Strøm-Tejsten, P., Zukowska, D., Wargocki, P., Wyon, D.P. 2015. The effects of bedroom air quality on sleep and next-day performance. – *Ind. Air.*, 26(5):679–686. DOI: 10.1111/ina.12254.
- Zorman, T., Jeršek, B. 2008. Assessment of Bioaerosol Concentrations in Different Indoor Environments. – *Indoor Built Environ.*, 17(2):155–163. DOI: 10.1177/1420326X08089251.
- Watanabe, T. 2010. *Identification of Fungi from: Pictorial Atlas of Soil and Seed Fungi, Morphologies of Cultured Fungi and Key to Species*. – CRC Press. 426 p.
- Winn, W.C., Koneman, E.W. 2006. *Koneman's color atlas and textbook of diagnostic microbiology*. 6<sup>th</sup> ed. – Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins. 1565 p.