
This is an electronic reprint of the original article.
This reprint may differ from the original in pagination and typographic detail.

Lestinen, Sami; Kilpeläinen, Simo; Kosonen, Risto; Jokisalo, Juha
Hiilidioksidipitoisuuden paikallinen ja ajallinen vaihtelu koulun luokkatilassa

Published in:
Sisäilmastoseminaari 2021. Verkkoseminaari 9.3.2021

Julkaistu: 01/01/2021

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

Please cite the original version:
Lestinen, S., Kilpeläinen, S., Kosonen, R., & Jokisalo, J. (2021). Hiilidioksidipitoisuuden paikallinen ja ajallinen vaihtelu koulun luokkatilassa. teoksessa M. Ahola, & A. Merikari (Toimittajat), *Sisäilmastoseminaari 2021. Verkkoseminaari 9.3.2021* (Sivut 125-130). (Sisäilmayhdistys raportti ; Nro 39). SIY Sisäilmatieto Oy.

This material is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of the repository collections is not permitted, except that material may be duplicated by you for your research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered, whether for sale or otherwise to anyone who is not an authorised user.

HIILIDIOKSIDIPITOISUUDEN PAIKALLINEN JA AJALLINEN VAIHTELU KOULUN LUOKKATILASSA

Sami Lestinen¹, Simo Kilpeläinen¹, Risto Kosonen^{1,2} ja Juha Jokisalo¹

¹ Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Konetekniikan laitos

² College of Urban Construction, Nanjing Tech University

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa tarkasteltiin luokkatilan oleskeluvyöhykkeen hiilidioksidijakaamaa tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla. Ilmanvaihto toimi lämpötila- ja hiilidioksidiohjauksella max. 6 L/s,hlö. Tuloilmalaite oli suutinkanavahajottaja ja poistoilmasäleikkö oli käytäväseinällä. Mittarit olivat pulpetin alla 0,7 m:n korkeudella ja luokan kulmassa 1,1 m:n korkeudella. Mittausdata tallennettiin 5 min välein 25 koulupäivänä klo 8-16. hiilidioksidipitoisuus nousi viitenä päivänä yli 1000 ppm:n ja yhtenä iltapäivänä yli 1700 ppm:n, jolloin tilassa oli suunniteltua enemmän oppilaita. Huipputuntien pitoisuus oli samaa luokkaa eri kohdissa huonetilaa hyvin sekoittavalla ilmanjakotavalla. Tällöin oleskeluvyöhykkeen korkeudella olevan anturin paikalla ei ole merkitystä ja yleinen käytäväseinäanturi soveltuu ilmanvaihdon ohjaamiseen.

JOHDANTO

Ilmanvaihdon tehtävä on tuoda puhdasta ilmaa hengitysvyöhykkeelle ja poistaa sisäilman epäpuhtauksia. Koulujen ja päiväkotien ilmanvaihto on ollut usein esillä, kun sisäilman laadusta on keskusteltu. Tutkimuksissa liian vähäisen ilmanvaihdon on todettu vaikuttavan ihmisten terveyteen ja viihtyvyyteen /1-3/. Monesti hiilidioksidipitoisuutta on pidetty ilmanvaihdon toiminnan mittarina. Kouluissa ja päiväkodeissa tämä on erityisen tärkeää, koska ilman laadulla on merkitystä oppimistuloksiin /4-6/ ja myös eri parametrien vuorovaikutuksesta ilman laatuun on löydetty näyttöä /7-8/. Nykyisessä sisäilmastoluokituksessa hiilidioksidin raja-arvo on S1-tason tilassa 350 ppm:n hiilidioksidipitoisuuslisä taustapitoisuuteen (Sisäilmayhdistys). Taustapitoisuus on vuonna 2020 ollut ulkoilmassa noin 400-450 ppm (Ilmatieteen laitos).

Työsuojelurahaston kenttätutkimuksessa tarkasteltiin hiilidioksidijakaamaa luokan oleskeluvyöhykkeellä ja luokan kulmauksessa, jossa myös ilmanvaihtojärjestelmän seinäanturi sijaitsi. Tutkimuksella selvitettiin, kuinka hiilidioksidipitoisuus vaihtelee ajallisesti ja paikallisesti koulupäivän aikana yhden kuukauden ajanjaksolla. Tutkimuksella selvitettiin ilmavirtaa ohjaavan anturin sijainnin merkitystä oleskeluvyöhykkeen hiilidioksidipitoisuuden hallinnassa.

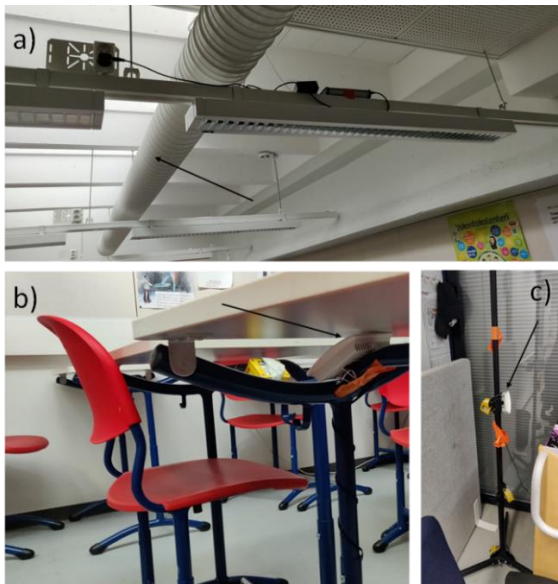
MENETELMÄT

25 henkilön luokan lattiapinta-ala oli 42 m² (Kuva 1). Luokan keskimääräinen henkilötiheys oli noin 1,7 m²/hlö ja koska luokan etuosassa oleva opettajan pöytä vei ison tilan, pulpetteja oli melko tiheässä.



Kuva 1. Pääkaupunkiseudulla mitatun luokahuoneen pulpettien sijoittelua.

Ilmanvaihtojärjestelmä toimi lämpötila- ja hiilidioksidiohjauksella, joiden raja-arvot olivat 21°C ja 650 ppm, ja joiden ylittyessä ilmanvaihtoa kasvatettiin vaiheittain (20%...100%). Luokan keskellä pulpettien yläpuolella oli 5 metriä pitkä pyöreä suutinkanavahajottaja (Kuva 2a), josta puhallettiin tuloilmaa 180° ylöspäin max. 6 L/s,hlö. Poistoilmasäleikkö oli huoneen keskellä käytäväseinällä. Kattoikkuna nosti huonekorkeutta.



Kuva 2. a) Luokan ilmanjaon suutinkanavahajottaja, b) hiilidioksidimittari pulpetin reunan alla ja c) hiilidioksidimittari luokan nurkassa.

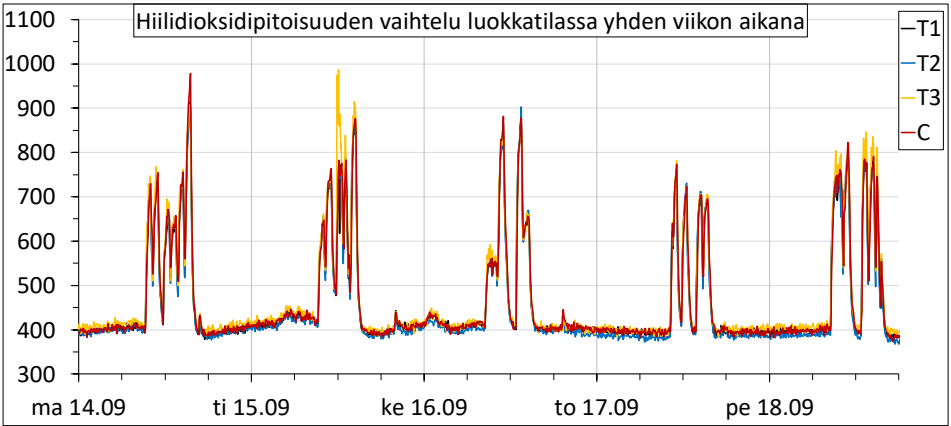
Hiilidioksidimittarit olivat pulpetin reunan alla jalkatelineessä noin 0,7 m:n korkeudella (Kuva 2b), jolloin ne olivat suojassa oppilaiden suoralta hengitykseltä. Kulmauksessa hiilidioksidimittari oli 1,1 m:n korkeudella (Kuva 2c). Hiilidioksidimittareiden tarkkuustaso oli $\pm(3\%+50 \text{ ppm})$. Mittausdataa tallennettiin viiden minuutin välein 25 koulupäivänä klo 8-16 välisenä aikana. Taulukossa 1 on esitetty tutkimuksessa käytetty hiilidioksidimittari.

Taulukko 1. Tutkimuksessa käytetty hiilidioksidimittari.

Mittari	Mittaussuure	Tarkkuus
Tinytag CO2 logger TGE-0011	hiilidioksidi	± (50 ppm +3% mittausarvo)

TULOKSET

Kuvissa 3-5 esitetään hiilidioksidipitoisuuden ajallista vaihtelua luokkatilassa. Kuva 3 esittää hiilidioksidipitoisuuden vaihtelua syyskuussa yhden viikon arkipäivien ajanjaksolta.

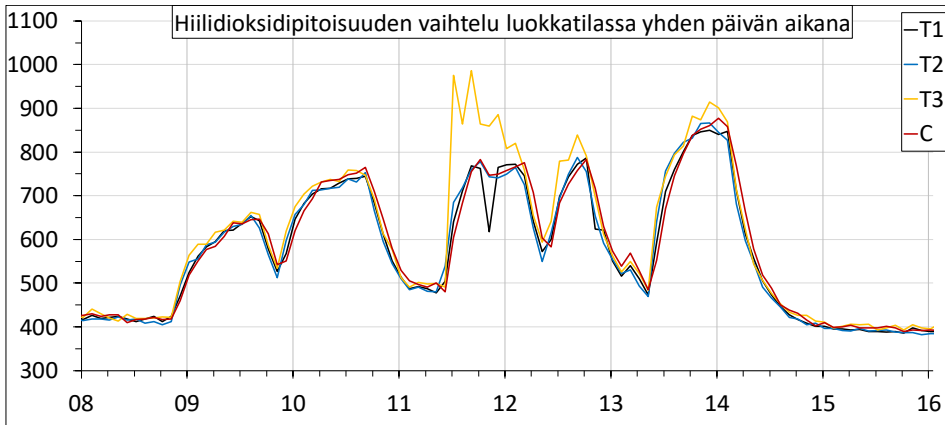


Kuva 3. Luokan hiilidioksidipitoisuuden vaihtelua yhden viikon aikana [ppm]. T1 on luokan etuosassa, T2 on luokan keskellä, T3 on luokan takaosassa ja C on luokan nurkka.

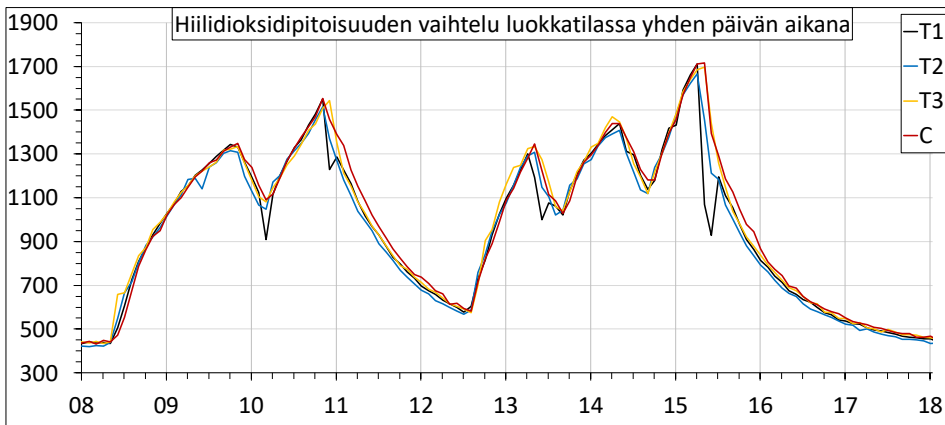
Kuvasta 3 nähdään, että pulpeteissa olevien mittareiden (T1-T3) ja luokan nurkassa olevan mittarin (C) mitaamat pitoisuudet olivat useimmiten samaa suuruusluokkaa, mikä viittaa siihen, että hiilidioksidi sekoittuu hyvin luokkatilassa. Tässä huipputuntien tasot olivat suurempia alkuviikosta kuin loppuviikosta.

Kuvassa 4 on esitetty yksittäinen arkipäivä, jolloin luokan takaosassa oli selvästi suurempi pitoisuus kuin luokan etuosassa. Tähän on voinut vaikuttaa päivittäinen tilakäyttö ja epäsymmetrinen kuormitus, jolloin oppilaat ovat saattaneet olla luokan takaosassa ja ihmisten hiilidioksidituoton ja huonetilan ilmapvirtausten seurauksena hiilidioksidipitoisuus olisi sitten noussut muita mittauskohtia suuremmaksi.

Kuva 5 esittää pitoisuuden vaihtelua arkipäivänä, jolloin luokassa mitattiin koko mittausjakson suurin hetkellinen pitoisuus, noin 1700 ppm. Tämä johtuu todennäköisesti tavanomaista suuremmasta oppilasmäärästä, joka voisi karkeasti arvioiden olla 40-50 henkilöä tavanomaisen 25 henkilön sijasta. Mittareiden arvot olivat samaa suuruusluokkaa paikallisissa ääriarvokohdissa, mutta ajallisia eroja oli havaittavissa pitoisuuksien muuttuessa voimakkaasti.



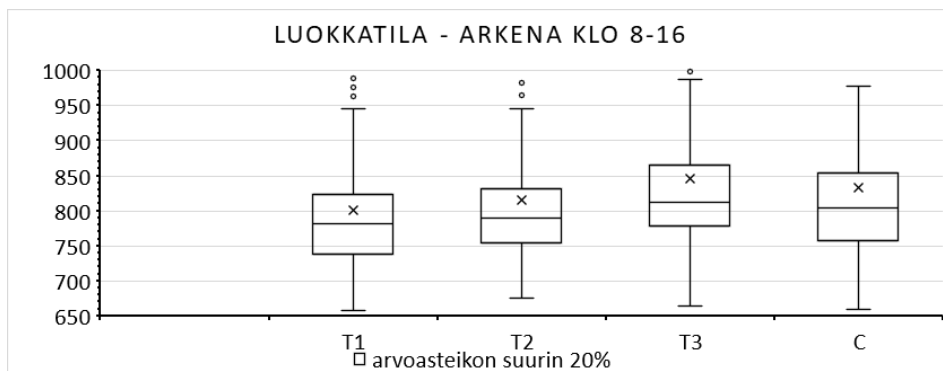
Kuva 4. Luokan hiilidioksidipitoisuuden [ppm] vaihtelu arkipäivänä, jolloin havaittiin koko mittausjakson suurin erotus eri mittareiden välillä (epäsymmetrinen kuormitus).



Kuva 5. Luokan hiilidioksidipitoisuuden [ppm] vaihtelu arkipäivänä, jolloin havaittiin koko mittausjakson suurin pitoisuus (tavanomaista suurempi ihmismäärä).

Paikallista vaihtelua tarkasteltiin arvosarjojen osajoukoilla. Ensimmäiseen osajoukkoon valittiin pitoisuuksien päivittäinen suurin 20%. Kuvasta 6 nähdään, että osajoukon mediaani (laatikon keskiviiva) ja keskiarvo ($\bar{x}$) kasvoivat jonkin verran luokan etuosasta luokan takaosaan. Luokan etunurkan pitoisuudet olivat tilan keskiosan suuruusluokkaa.

Tämä voidaan havaita myös toisesta osajoukosta, johon valittiin pitoisuuksien päivittäiset huipputunnit (Taulukko 2). Jokainen huipputunti oli hetkellisten pitoisuuksien keskiarvo yhden tunnin ajalta. Tuloksista nähdään, että hiilidioksidipitoisuuden arkipäivien huipputuntien keskiarvot eivät poikenneet toisistaan merkittävästi. Keskimääräinen hiilidioksidipitoisuus muodostui kuitenkin huipputuntien aikana suurimmaksi luokan takaosassa.



Kuva 6. Luokkatilan hiilidioksidipitoisuuden jakauma [ppm], kun arvojoukossa on hiilidioksidipitoisuuden päivittäisen arvosarjan suurin 20 %. Laatikko-janakuvio on laskettu Excelin `quartile.inc` funktiolla, jossa arvosarja jaetaan neljänneksiin. Poikkeavat arvot näkyvät yksittäisinä pisteinä ja keskiarvoa on merkitty symbolilla x.

Taulukko 2. Luokkatilan hiilidioksidipitoisuuden arkipäivien huipputuntien jakauma.

mittari	T1	T2	T3	C
otanta [kpl]	25	25	25	25
keskiarvo [ppm]	747	753	770	766
minimi [ppm]	612	626	622	618
maksimi [ppm]	1393	1376	1415	1424
keskihajonta [ppm]	147	140	147	150

Päivittäisten huipputuntien pitoisuuserot eivät olleet merkittäviä mittarin tarkkuus huomioon ottaen. Pitoisuuserot luokan taka- ja etuosan (opettajan pöytä) välillä olivat keskimäärin 23 ± 20 ppm ($\text{avg} \pm \text{sd}$) maksimieron ollessa 79 ppm. Edessä olevan kulmauksen pitoisuudet olivat lähempänä luokan takaosan kuin luokan etuosan pitoisuutta. Hiilidioksidipitoisuus nousi viitenä päivänä yli 1000 ppm:än ja yhtenä iltapäivänä yli 1700 ppm:än. Muutoin pitoisuudet olivat normaalilla tasolla.

YHTEENVETO

Tulokset osoittavat, että hiilidioksidipitoisuus oli melko sama eri kohdissa huonetilaa ja ajallista vaihtelua näytti olevan lähinnä pitoisuuden muuttuessa voimakkaasti.

Pitoisuudet olivat keskimäärin jonkin verran suurempia luokan takaosassa kuin luokan etuosassa. Nurkassa hiilidioksidipitoisuus oli luokan keskiosan suuruusluokkaa.

Pitoisuuserot olivat yleensä pienempiä kuin valmistajan ilmoittama mittarin tarkkuustaso. Oppilaiden hengitysvyöhykkeellä hiilidioksidipitoisuus voi olla mitattua suurempi, jolloin myös pitoisuuden paikallinen ja ajallinen vaihtelu voi olla suurempaa.

Tulosten perusteella huoneilma on varsin sekoittunutta ja oleskeluvyöhykkeen korkeudella olevan anturin paikalla ei silloin ole suurta merkitystä. Näin ollen hyvin sekoittavalla ilmanjakotavalla yleinen käytäväseinäanturi soveltuu hyvin muuttuvailmavirtajärjestelmän ohjaamiseen.

KIITOKSET

Tutkimusta ovat rahoittaneet Työsuojelurahasto, Aalto-yliopistokiinteistöt Oy (ACRE) ja Senaatti-kiinteistöt sekä Helsingin, Espoon ja Vantaan kaupungit.

LÄHDELUETTELO

1. Seppänen, O. A., Fisk, W. J., and Mendell, M. J. (1999) Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor air*, 9(4), 226-252.
2. Sundell, J., Levin, H., Nazaroff, W. W., Cain, W. S., Fisk, W. J., Grimsrud, D. T., ... and Samet, J. M. (2011) Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor air*, 21(3), 191-204.
3. Wargocki, P., Sundell, J., Bischof, W., Brundrett, G., Fanger, P. O., Gyntelberg, F., ... and Wouters, P. (2002) Ventilation and health in non-industrial indoor environments: report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN). *Indoor air*, 12(2), 113-128.
4. Haverinen-Shaughnessy, U., Shaughnessy, R. J., Cole, E. C., Toyinbo, O., & Moschandreas, D. J. (2015). An assessment of indoor environmental quality in schools and its association with health and performance. *Building and Environment*, 93, 35-40.
5. Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2007). The effects of outdoor air supply rate and supply air filter condition in classrooms on the performance of schoolwork by children (RP-1257). *Hvac&r Research*, 13(2), 165-191.
6. Chatzidiakou, L., Mumovic, D., and Summerfield, A. J. (2012) What do we know about indoor air quality in school classrooms? A critical review of the literature. *Intelligent Buildings International*, 4(4), 228-259.
7. Mendell, M. J., and Heath, G. A. (2005) Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor air*, 15(1), 27-52.
8. Daisey, J. M., Angell, W. J., and Apte, M. G. (2003) Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. *Indoor air*, 13(1), 53-64.