

Rakennuksen ulkovaipan yli vaikuttavien paine-erojen määrittäminen rakennusfysikaalisia laskentatarkasteluja varten

Topi Moisio, Anssi Laukkarinen ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitetään perustason menetelmä rakennuksen vaipan yli esiintyvien paine-erojen laskemiseksi sekä esitetään vertailulaskelmia tuulen painekertoimien valinnasta sekä koneellisen ilmanvaihdon ja rakennuksen ilmatiivyyden roolista. Paine-erojen suuruus riippuu vahvasti rakennuksen muodosta, ympäröivistä tuulisuusolosuhteista, vaipan ilmatiivyydestä ja ilmanvaihdon toteutustavasta, joten lähtökohtaisesti rakenne- ja talotekniikkasuunnittelijoiden on suositeltavaa arvioida paine-erojen hallinnan ratkaisuja tapauskohtaisesti. Tiiviiseen muotoon kootun esityksen toivotaan lisäävän ilmapuototarkastelun tekemistä rakennusfysikaalisia laskentatarkasteluja toteutettaessa.

1. Johdanto

Rakennuksen vaipparakenteiden läpi kulkevat ilmapuodot voivat ylipainetilanteessa kasvattaa rakenteiden kosteuskuormia ja toisaalta alipainetilanteessa kuljettaa sisäilmaan sen laatua heikentäviä aineita. Ilmapuotojen pienentäminen ja asianmukaisia reittejä pitkin kulkevan ilmanvaihdon toteuttaminen ovat olleet yksi laaja trendi Suomessa 2000-luvulla ja tämän seurauksena esimerkiksi uudisrakennusten keskimääräistä ilmatiivyyttä on saatu parannettua 2000-luvun alussa vallinneesta tasosta.

Rakennusten ilmatiivyyden parantaminen tarkoittaa kuitenkin samalla myös sitä, että koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon kohteissa voi syntyä aikaisempaa suurempia ilmanpaine-eroja rakennuksen ulkovaipan yli, ellei ilmanvaihdon ilmapuotoja ole säädetty aikaisempaa huolellisemmin. Koko rakennuksen ilmatiivyyden paraneminen ja paine-erojen kasvaminen voi aiheuttaa aikaisempaa suurempia keskitettyjä ilmapuotoja rakennuksen vaipan yksittäisiin kohtiin, verrattuna niiden jakautumiseen tasaisemmin ympäri vaippaa.

Paine-erojen ja ilmatiivyyden vaikutuksia rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan on mahdollista arvioida rakennusfysikaalisten laskentaohjelmien avulla (esimerkiksi COMSOL, Delphin tai WUFI), mutta näiden tarkastelujen tekemiseksi käyttäjän tulee määrittää rakenteen yli vallitseva paine-ero vuoden eri ajanhetkinä. Tämän artikkelin tarkoituksena on esittää kootusti ja tiiviissä muodossa yksi tapa määrittää rakennuksen vaipan yli vaikuttavat ilmanpaine-erot laskennallisesti, jotta niitä on mahdollista käyttää rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa lähtötietoina. Esitetty menetelmä perustuu lämmön- ja aineensiirron perusteoriaan [1, luku 16], mutta se ei ota huomioon esimerkiksi eri ilmapuotosten keskinäisiä vuorovaikutuksia [2], ilmapuotosten ja ilmanpaineen vaihtelua yksittäisen rakenneosan eri kohdissa [1, luku 24] tai useasta erilaisesta geometrisesta ja/tai sisäolosuhdealueesta koostuvien rakennusten erityispiirteitä.

Artikkeli perustuu COMBI-tutkimushankkeessa [3] tehtyyn taustatyöhön sekä Knauf Oy:n rahoittamaan tutkimushankkeeseen kipsilevytuulensuojallisten puurankaseinien lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnasta [4].

2. Ilmanpaine-eron laskeminen

2.1 Yleistä

Paine-eron määritelmä on esitetty kaavassa (1).

$$P_i = P_e + \Delta P \quad (1)$$

missä

- P_e on ulkoilman absoluuttinen ilmanpaine, Pa (normaali-ilmanpaine 101325 Pa)
- ΔP on paine-ero sisä- ja ulkoilman välillä, Pa
- P_i on sisäilman ilmanpaine, Pa.

Ilmanpaineen arvot riippuvat tarkastelupisteestä ja vaihtelevat tyypillisesti ajanhetkestä toiseen. Laskentatarkasteluissa ulkoilman paine P_e oletetaan tyypillisesti vakioksi, koska rakenteiden läpi tapahtuvan virtauksen oletetaan riippuvan ainoastaan sisä- ja ulkoilman välisestä paine-erosta, ei paineen absoluuttisesta tasosta. Paine-ero lasketaan kaavan (2) mukaisesti.

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_w + \Delta P_v \quad (2)$$

missä

- ΔP_T on sisä- ja ulkoilman välisestä lämpötilaerosta aiheutuva paine-ero, Pa
- ΔP_w on tuulesta aiheutuva paine-ero, Pa
- ΔP_v on ilmanvaihtolaitteiden luoma paine-ero, Pa.

Seuraavassa käydään läpi yksittäisten paine-eroa aiheuttavien tekijöiden laskenta.

2.2 Paine-ero lämpötilaerosta

Lämpötilaeroista aiheutuvien paine-erojen laskentakaavat on esitetty seuraavassa (kaava 3-4).

$$P(z) = P_0 - \rho_a g z \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{T,z} &= (P_{0,i} - \rho_{a,i} g z) - (P_{0,e} - \rho_{a,e} g z) \\ &= (P_{0,i} - P_{0,e}) + g z \cdot (\rho_{a,e} - \rho_{a,i}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta P_{T,z} = g z \cdot \left(\frac{P_e}{R_a T_e} - \frac{P_i}{R_a T_i} \right) = g z \cdot \left(\frac{P_e}{R_a T_e} - \frac{P_e + \Delta P}{R_a T_i} \right) \approx \frac{g z P_e}{R_a} \cdot \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right) \quad (5)$$

missä

- $P_{0,i}, P_{0,e}$ ovat sisä- ja ulkoilman ilmanpaineeseen liittyvät perustasot, joista paine-eron kehittymistä kummassakin tilanteessa lasketaan, Pa
- $\rho_{a,i}, \rho_{a,e}$ ovat sisä- ja ulkoilman tiheydet, kg/m³
- T_i, T_e ovat sisä- ja ulkoilman lämpötilat, K
- z on pystysuuntainen etäisyys lämpötilaerosta aiheutuvan paine-eron nollakohdasta (neutraaliakselista), ylöspäin positiivinen, m
- g on putoamiskiihtyvyyden vakio, 9,81 m/s²
- R_a on ilman ominaiskaasuvakio, 287 J/(kgK).

Jos rakennuksen ulkopuolella olevan ilman oletetaan olevan vakiolämpötilassa ja muita tekijöitä ei oteta huomioon, niin tällöin suurin ilmanpaine ulkoilmassa on maanpinnan (merenpinnan) tasolla, josta ilmanpaine alkaa ylöspäin noustessa pienemään (kaava 3). Sisä- ja ulkoilman lämpötilojen poiketessa toisistaan, poikkeavat ilmamassojen tiheydet toisistaan. Tällöin

absoluuttinen paine muuttuu pystysuunnassa eri tilanteissa eri tavoin, mikä synnyttää paine-eron sisä- ja ulkoilman välille (kaava 4).

Ilmanpaineen perustasojen $P_{0,i}$ ja $P_{0,e}$ oletetaan sijaitsevan samalla korkeudella, jolloin etäisyys perustasosta z voidaan käsitellä yhdellä muuttujalla kahden sijaan. Olettamalla perustasot lisäksi yhtä suuriksi saadaan samalla määriteltä lämpötilaerosta aiheutuvan paine-eron neutraaliakseliksi se korkeusasema, jossa lämpötilaeron vallitessa paine-ero on nolla. Korkeusasema z tarkoittaa siis tarkastelupisteen pystysuuntaista etäisyyttä lämpötilaerosta aiheutuvan paine-eron nollakohdasta (neutraaliakselista). Kaavassa (5) esitetty sievennetty muoto on saatu käyttämällä ideaalikaasun tilayhtälöä ilman tiheyden laskemiseen, minkä lisäksi termi $\Delta P / (R_a T_i)$ on supistettu pienenä pois tuloksista.

Sisä- ja ulkoilman lämpötilat oletetaan edellä olevissa kaavoissa tarkastelualueella vakioiksi, vaikka erittäin hyvin sekoittunutta sisäilmaa lukuun ottamatta kumpikin lämpötila muuttuu pystysuunnassa liikuttaessa. Laskentamallia on mahdollista tarkentaa muun muassa tältä osin.

2.3 Paine-ero tuulesta

Kun tuuli törmää rakennuksen ulkopintaan, sen aiheuttamaa absoluuttista painetta voidaan kuvata kaavan (6) mukaisella lausekkeella, jossa painekerroin c_p sisältää tuulen kohtaamiskulman ja rakennuksen muodon vaikutukset. Tuulesta aiheutuvan paine-eron suuruus vaihtelee eri julkisivupintojen välillä, mutta myös yksittäisen julkisivupinnan alueella. Perustapauksessa painekertoimien oletetaan kuitenkin olevan alueittain vakioita, esimerkiksi matalan rakennuksen tapauksessa julkisivupinnoittain. Tuulen nopeus v on suositeltavaa tarkastella maastoluokittain ja rakennuksen korkeuden mukaan. Rakennuksen sijaintipaikan mukaisen paikallisen tuulennopeuden laskentaan voi käyttää standardin SFS-EN 1991-1-4 [5] mukaisia kaavoja.

Tuuli vaikuttaa rakennuksen ulkopinnan lisäksi myös rakennuksen sisäolosuhteisiin, jotka kuvataan sisäpuolisen painekertoimen avulla. Paine-ero ulkovaipan yli lasketaan näiden kertoimien erotuksena kaavan (7) mukaisesti.

$$P_w = \frac{1}{2} c_p \rho_a v^2 \quad (6)$$

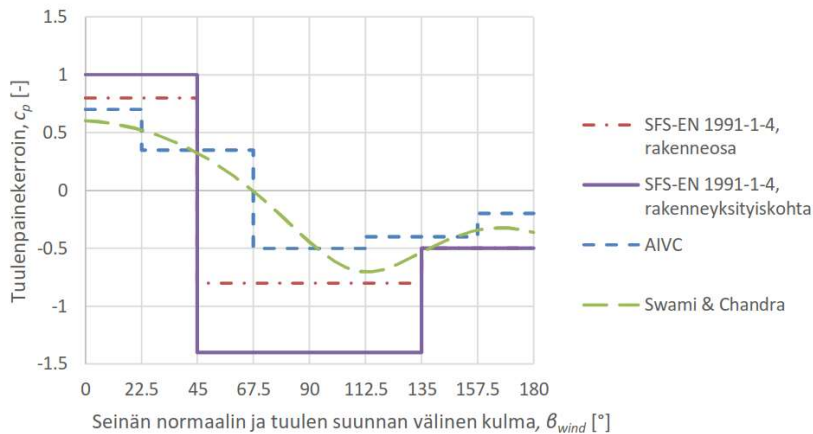
$$\Delta P_w = (c_{pi} - c_{pe}) \cdot \frac{\rho_a v^2}{2} \quad (7)$$

missä

c_{pi} , c_{pe} ovat tarkasteltavan tilanteen geometriasta riippuvat sisä- ja ulkopuoliset tuulenpainekertoimet, -

v on häiriintymättömän tuulen nopeus tuulen ylävirrassa, m/s.

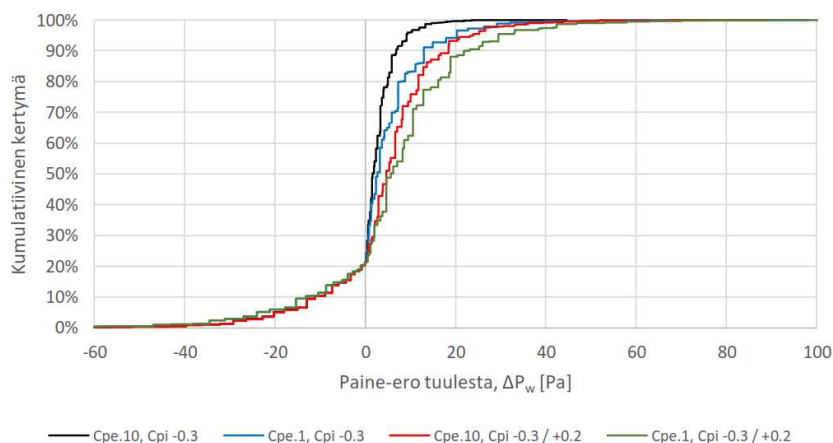
Rakennuksen ulkopuolisille painekertoimille on esitetty useita eri arvoja, joista kuvaan 1 on kerätty kirjallisuuskatsauksen perusteella merkittävimmät.



Kuva 1 Seinien ulkopintojen painekertoimen arvoja eri kirjallisuuslähteistä. Tietyille kohtaamiskulmille ilmoitettujen arvojen väliset tilanteet on käsitelty vakioarvoina jakamalla kulma-alueet taulukoitujen arvojen puolesta välistä. [4]

Sisäpuolisen painekertoimen arvon voi laskea melko helposti tapaukselle, jossa sisäpuolisen painekertoimen oletetaan olevan vakio kaikilla ulkovaipan sisäpinnoilla. Tällöin kirjoitetaan tuulesta aiheutuvien ilmapuotojen tase ja asetetaan se nolllaksi, sijoitetaan taseyhtälöön paineerojen lausekkeet vaipan osittain kaavan (7) mukaisesti ja sen jälkeen ratkaistaan yhtälöstä sisäpuolisen painekertoimen arvo. Eri vaipan osille voidaan asettaa myös toisistaan poikkeavat ilmatiiviyydet, jolloin sisäpuoliset painekertoimet voivat saada joko positiivisia tai negatiivisia arvoja tilanteesta riippuen. Esimerkiksi ilmatiiviydeltään tasatiiviissä rakennuksessa sisäpuolinen painekerroin on negatiivinen, mutta jos rakennuksen tuulenpuoleinen seinä on vahvasti epätiiviimpi muihin vaipan osiin nähden, muuttuu sisäpuolinen painekerroin positiiviseksi.

Seuraavassa kuvassa on vertailtu kuusi metriä korkean pohjoisseinän tuulesta aiheutuvan paineeron muodostumista erilaisilla sisä- ja ulkopuolisen painekertoimien yhdistelmillä [4].



Kuva 2 Tuulesta aiheutuva paine-ero kuusi metriä korkealla pohjoisseinällä rakennusfysiikaalisen testivuoden Jokioinen 2004 olosuhteissa. Eri tapaukset tarkoittavat erilaisia sisä- ja ulkopuolisten painekertoimien yhdistelmiä. [4]

Kuvan 2 perusteella ulko- ja sisäpuolisten painekertoimien valinnalla on vaikutusta erityisesti ylipaineen suuruuteen. Kantavien rakenteiden mitoituksessa käytetty muuttuvan sisäpuolisen painekertoimen (-0,3/+0,2) menetelmä tuotti vakioarvoa -0,3 suuremmat paine-erot, mutta kyseinen menetelmä sisältää fysikaalisesti mahdottoman oletuksen ilmatiiviyyden jakauman

jatkuvasta muuttumisesta tuulen suunnan mukaan. Suositeltavampi menetelmä on joko tehdä oletus tasaisesti jakautuneesta ilmatiivyydestä ($c_{pi} = -0,3$) tai laskea sisäpuolisen painekertoimen arvo tapauskohtaisesti eri tavoin jakautuneille vaipan ilmatiiviyksille.

2.4 Paine-ero koneellisesta ilmanvaihdosta

Koneellisesta ilmanvaihdosta aiheutuva paine-ero lasketaan vaipan läpi tulevan korvausilmavirran ja vaipan ilmatiivyyden avulla (kaavat 8-10). Kaavassa tulee erikseen huolehtia paine-eron etumerkin oikeasta käsittelystä.

$$q_{vaippa} = c\Delta P^n = \left(\frac{q_{50}}{\Delta P_{50}^n}\right) \cdot \Delta P^n = q_{50} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_{50}}\right)^n \quad (8)$$

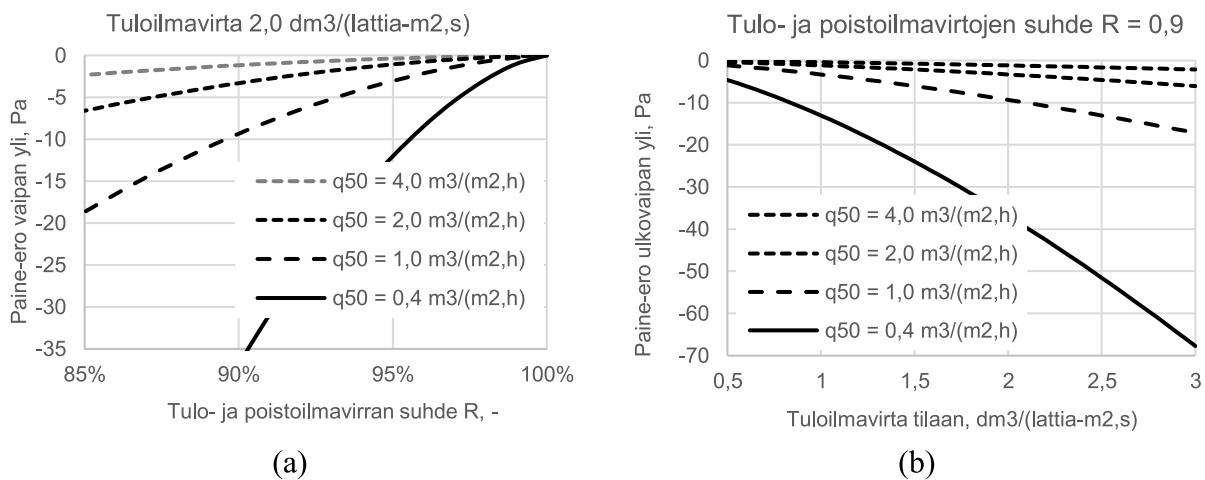
$$\Delta P = \Delta P_{50} \cdot \left(\frac{q_{vaippa}}{q_{50}}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

$$q_{vaippa} = \frac{q_{v,tulo} - q_{v,poisto}}{A_{vaippa}} = \frac{q_{v,tulo}}{A_{vaippa}} \cdot \left(1 - \frac{1}{R}\right) = \frac{q_{v,tulo,omin} A_{lattia}}{A_{vaippa}} \cdot \left(1 - \frac{1}{R}\right) \quad (10)$$

jossa

- q_{vaippa} on ilmavuoto rakennuksen vaipan läpi, $m^3/(m^2h)$
- c, n ovat rakennuksen ilmavuotojen virtauskerroin $m^3/(m^2hPa^n)$ ja virtausekspONENTTI (n). Kerroin c ratkaistaan ilmatiiviyksmittauksen tuloksista ja kerroin n oletetaan tässä tunnetuksi ($n = 0,667$).
- $\Delta P, \Delta P_{50}$ ovat paine-erot vaipan yli vallitsevissa olosuhteissa ja ilmatiiviyksmittauksessa ($\Delta P_{50} = 50$ Pa), Pa
- q_v on tulo- tai poistoilmavirta tilaan, m^3/h
- A_{vaippa}, A_{lattia} ovat rakennuksen tai tilan ilmanpaine-eroa ylläpitävän vaipan pinta-ala sekä saman tilan lattiapinta-ala, m^2
- q_{50} on rakennuksen ilmatiiviyksluku, $m^3/(m^2h)$
- R on tulo- ja poistoilmavirtojen suhde, $R = q_{v,tulo}/q_{v,poisto}$ -

Kuvassa 3 on esitetty paine-ero koneellisen ilmanvaihdon ilmavirtojen suhteen ja lattiapinta-alaa kohti olevan tuloilmavirran funktiona. Kuvissa on tarkasteltu 20 m x 40 m x 3 m suuruista tilaa.



Kuva 3 Koneellisen ilmanvaihdon tulo- ja poistoilmavirtojen epätasapainosta aiheutuva paine-ero vaipan yli eri tilanteissa. Vaipan ja lattian pinta-alojen suhde on 2,45.

Tuloksien perusteella rakennuksen ilmatiiviys, tulo- ja poistoilmavirtojen suhde ja tuloilmavirran määrä ovat kaikki kytköksissä toisiinsa vaipan yli esiintyvän paine-eron kautta. Suureet pystyvät jossain määrin kompensoimaan toisiaan, mutta esimerkiksi tilanteessa, jossa ilmavirrat ovat suuria ja vaipan ilmanvuotoluku erityisen alhainen, tulisi tulo- ja poistoilmavirrat pystyä säätämään hyvin lähelle toisiaan, jotta paine-erot vaipan yli pysyisivät pieninä.

3. Yhteenveto

Tässä artikkelissa on esitetty yleisesti käytettyihin laskentamenettelyihin perustuva kokonaisuus ilmanpaine-eron laskemiseksi rakennuksen ulkovaipan yli sekä arvioitu tuulen painekertoimien valinnan ja ilmanvaihdon epätasapainon vaikutuksia paine-eron arvoihin. Tuulen osalta perustapauksessa laskenta on suositeltavaa tehdä käyttäen rakenneyksityiskohtien mukaisia painekertoimia $c_{pi,1}$ ja joko olettaa rakennus ilmatiiviydeltään tasaiseksi ($c_{pi} = -0,3$) tai laskea sisäpuolinen painekerroin tapauskohtaisilla vaipan ilmatiiviyyslukujen avulla. Ilmanvaihdon ja ilmatiiviyden osalta suurimmat paine-erot muodostuivat suuren tuloilmavirran, suuren tulo- ja poistoilmavirtojen epätasapainon sekä hyvin ilmatiiviin vaipan tapauksessa.

Rakennusfysikaalisten lämpö- ja kosteuslaskelmien näkökulmasta katsottuna ylipaineen kasvattaminen lisää rakenteisiin kohdistuvia kosteuskuormia, joten tarkempien tietojen puuttuessa suuremman ylipaineen tuottavien arvojen valitseminen parantaa laskennan varmuutta esiintyviin olosuhteisiin nähden. Pidemmällä aikavälillä on kuitenkin suositeltavaa arvioida paine-erolaskennan tarkkuutta todellisiin kohteisiin verrattuna, jotta ylipaineen aiheuttamien kosteuskuormien lisäksi myös muiden tekijöiden vaikutukset saadaan otettua sopivassa suhteessa huomioon.

Lähdeluettelo

- [1] ASHRAE Handbook – Fundamentals (2017). American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA. ISBN 978-1-939200-58-7. 1000 p.
- [2] Johansson, D. (2008) Under-balancing mechanical supply and exhaust ventilation systems with heat recovery – effects on energy use. In: Rode, C. (Ed.) (2008) Proceedings of the 8th symposium on building physics in the Nordic countries: Copenhagen, June 16-18, 2008. Danish Society of Engineers, IDA. BYG Rapport, No. R-189.
- [3] Vinha, J., Laukkarinen, A., Kaasalainen, T., Pihlajamaa, P., Teriö, O., Jokisalo, J., ... Uusitalo, S. (2019). Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings (COMBI). Tutkimushankkeen johdanto- ja yhteenvetoraportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laboratorio. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti; No. 168. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-4306-7>
- [4] Topi Moisio (n.d.) Puurankarunkoisten ulkoseinien liitosten lämpö- ja kosteustekninen toiminta. Diplomityö. Tampereen yliopisto, rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, rakennesuunnittelu. xx s. + yy. liites. (julkaistaan 2019)
- [5] SFS-EN 1991-1-4+AC+A1 (2011) Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki. 254 s.