

# Teräsprofiliovien U-arvon parantaminen

Anssi Laukkarinen<sup>1</sup>, Minna Korpi<sup>2</sup>, Juha Vinha<sup>1</sup>, Jari Vaittinen<sup>3</sup> ja Teuvo Vaittinen<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

<sup>2</sup> Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, 2009 asti

<sup>3</sup> Jaatimet Oy

## Tiivistelmä

Tässä tekstissä esitetään standardoitu laskentamenetelmä teräsrakenteisten ovien U-arvolaskentaan. Lisäksi käydään läpi teräsovien eri rakenneratkaisujen vaikutusta koko oven U-arvoon.

## 1. Johdanto

Rakennusten energiamääräysten kiristyessä myös rakennusten ulko-oville asetettavat vaatimukset tiukentuvat. Ulko-ovien lämmönläpäisykertoimen (U-arvon) vertailuarvo on tällä hetkellä 1,0 W/(m<sup>2</sup>K) (RakMK D3-2012). Ovien U-arvon todentaminen on mahdollista tehdä joko mittaamalla [1] tai laskemalla [2] ja [3]. Mittauksin saadaan tietoa todellisen rakenteen ominaisuuksista ja käyttäytymisestä, mutta tällöin tarvitaan olemassa oleva rakenne tai mallikappale.

Laskennallisten tarkastelujen avulla pystytään arvioimaan eri ratkaisujen vaikutusta rakenteen ominaisuuksiin etukäteen, jolloin muutosten ja vertailujen tekeminen on helppoa. Tässä tekstissä esitellään kansainvälisissä ISO-standardeissa esitelty numeerinen laskentamenetelmä ikkunoiden ovien U-arvojen laskentaan. Lisäksi käydään yleisellä tasolla läpi eri muuttujien vaikutusta rakenteen U-arvoon.

## 2. Menetelmät

### 2.1 Standardit ja laskentamallin yksinkertaistukset

Standardi SFS-EN ISO 6946 [4] ohjaa ilmasta ilmaan rajoittuvien rakenteiden U-arvon laskentaa. Standardin esittelemä laskentatapa on käsinlaskentaan soveltuva lämmönvastuksen ylä- ja alalikiarvon laskentamenetelmä, jota voidaan käyttää epähomogeenisista kerroksista koostuvan rakenteen U-arvolaskentaan. Laskentamenetelmää ei kuitenkaan voi käyttää, jos lämmönvastuksen ylä- ja alalikiarvon suhde on yli 1,5 tai jos metallirakenne läpäisee tarkasteltavan rakenteen. Yksittäiset pistemäiset teräsosat (kuten tiilimuurin siteet) on kuitenkin mahdollista ottaa rakenteen U-arvolaskennassa huomioon standardin liitteen D korjauskertoimien avulla.

Jos ylä- ja alalikiarvon laskentamenetelmää ei voida käyttää, tulee laskenta tehdä tarkemmilla menetelmillä. Standardi SFS-EN ISO 10211 [5] käsittelee rakenteen lämpötilakentän sekä lämpövirtojen laskentaa numeerisesti siihen soveltuvilla laskentaohjelmilla. Tarkasteltavasta rakenteesta on yleensä järkevää valita mahdollisimman pieni osa, joka kuitenkin edustaa koko rakenteen käyttäytymistä. Laskentamallin leikkaus on mahdollista tehdä rakenteen symmetrialinjoilta tai vaihtoehtoisesti minimimitan  $d_{\min}$  etäisyydeltä siitä rakenteen osasta, jota ei

voi kuvata laskentamallia yksinkertaisemmalla mallilla (esimerkiksi kerroksellinen paneeliosa voidaan kuvata 1D-laskentamallilla, mutta nurkkaa varten tarvitaan 2D-laskentamalli). Standardi antaa arvoja minimimitalle  $d_{\min}$ .

Lähtökohtaisesti yksinkertaistamaton laskentamalli on parempi kuin yksinkertaistuksia sisältävä [5, luku 5.3.1]. Laskentamallia on kuitenkin vähäisissä määrin mahdollista muokata niin, että rakenteen geometrian ja materiaaliominaisuuksien yksinkertaistaminen ottaa huomioon todellisessa rakenteessa esiintyvät epäjatkuvuuskohdat. Esimerkiksi rakenteen yksittäisiä pieniä materiaali alueita tai kahden materiaalin vinoa liitospaikkaa on mahdollista muokata mallintamisen helpottamiseksi. Yksinkertaistettavien materiaali alueiden lämmönjohtavuuden tulee olla alle 3 W/(mK). Ei-metalliset alle 1 mm paksut kerrokset tai rakenteen lämpötekniseen toimintaan vaikuttamattomat metalliset ohuet kerrokset on mahdollista jättää laskentatarkastelusta pois.

Kokonaisuuden kannalta vaikutuksiltaan vähäiset rakenteen pistemäiset ja viivamaiset kylmäsiilat on mahdollista mallintaa käyttäen rakenteen päämateriaalille tehollista lämmönjohtavuuden arvoa. Tällöin esimerkiksi lämmöneristekerroksen läpäisevien metallisten kiinnikkeiden voidaan katsoa kasvattavan lämmöneristeen lämmönjohtavuutta niin, että sekä yksinkertaistamattomalla että yksinkertaistetulla rakenteella rakenteen läpi kulkee sama lämpövirta. Yksinkertaistuksen ehtoina ovat muun muassa että kylmäsiilat ovat lähes lämpövirran suuntaiset, rakenteen lämmönvastus sisäpinnasta ulkopintaan yksinkertaistuksen jälkeen on vähintään 1,5 m<sup>2</sup>K/W ja että yksinkertaistetun kerroksen lämmönjohtavuus on enintään 1,5-kertainen kerroksessa ennen yksinkertaistusta esiintyvien materiaalien alhaisimpaan lämmönjohtavuuteen verrattuna. Viimeinen ehto esimerkiksi useimmiten mahdollistaa puurankojen vaikutuksen sisällyttämisen lämmöneristeen lämmönjohtavuuteen, mutta lämmöneristekerroksen läpäisevät teräsraungat edellyttävät tarkempaa käsittelyä.

Ikkunoiden ja ovien U-arvolaskentaa varten on annettu lisäohjeita standardeissa [2] ja [3]. Standardin [3, luku 4] mukaisesti laskennassa käytetään kaksiulotteista lämmönsiirron laskentaa lähteen [5] ohjeiden mukaisesti. Tällä rajataan tarkastelusta pois pistemäisissä osissa kuten nurkissa, saranoissa ja kahvoissa tapahtuva lämmön kolmiulotteinen siirtyminen. Myöskään auringon säteily, ilmapuotojen tai tarkasteltavan rakenteen liitosta ympäröivään rakenteeseen ei oteta huomioon standardin [3] mukaisessa laskentamenetelmässä.

Koko oven U-arvo lasketaan määrittämällä ensin jokaiseen erilaiseen karmi- ja paneeliosaan liittyvät lämpöhäviötermit. Tämän jälkeen kunkin osan lämpöhäviöt lasketaan yhteen oven geometristen mittojen suhteessa ja näin laskettu koko oven lämpöhäviö jaetaan oven koko pinta-alalle.

## 2.2 Lämmön johtuminen materiaalissa sekä rakenteen ontelot

Fourierin lain mukaan materiaalin läpi johtuvan lämpövirran tiheys on suoraan verrannollinen lämpötilagradienttiin kaavan (1) mukaisesti:

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

missä  $q_x$  = lämpövirran tiheys x-suunnassa, W/m<sup>2</sup>  
 $\lambda$  = materiaalin lämmönjohtavuus tarkasteltavassa pisteessä, W/(mK)  
 $T$  = lämpötila, K  
 $x$  = x-koordinaatti, m.

Teräsovieien lämpötila-/lämpövirtakentälle ei ole olemassa analyttistä ratkaisua geometrian monimutkaisuudesta johtuen. Lämmönsiirron laskentaan soveltuvia laskentaohjelmia on kuitenkin onneksi olemassa useita erilaisia, kuten HEAT, Therm tai Comsol Multiphysics. Nyt tehdyissä tarkasteluissa on käytetty HEAT 2 -laskentaohjelmaa [6]. Materiaalien lämmönjohtavuuksien arvot saadaan kirjallisuudesta sekä tarkasteltavien lämmöneristeiden valmistajilta.

Lämpö siirtyy johtumisen lisäksi myös säteilemällä sekä konvektiolla. Rakenteen sisällä olevissa onteloissa tapahtuva yhtäaikainen lämmön johtuminen, säteily sekä konvektio otetaan huomioon käyttämällä ontelon lämmönjohtavuudelle tehollista arvoa  $\lambda_{eq}$  [3, luku 6]. Rakenteen reunoilla olevat syvennykset luokitellaan joko tuulettumattomiksi, hieman (engl. slightly) tuulettuviksi tai hyvin tuulettuviksi. Rakenteen ulkoreunaan yhteydessä olevan ontelo tulkitaan tuulettumattomaksi, jos ontelo on yhteydessä ulkoilmaan alle 2 mm paksulla käytävällä. Syvennys on hieman tuulettuva, jos yhteyskäytävän koko on alle 10 mm ja hyvin tuulettuva, jos yhteyskäytävän koko ulkoilmaan on yli 10 mm. Tuulettumattoman ontelon tehollisen lämmönjohtavuuden laskemiseen on annettu tarvittavat kaavat standardissa [3]. Hieman tuulettumattoman ontelon tehollisena lämmönjohtavuutena käytetään kaksinkertaista tuulettumattoman ontelon tehollisen lämmönjohtavuuden arvoa. Reunalla olevan hyvin tuulettuvan ontelon reunoilla käytetään normaaleja standardin [4] mukaisia sisä- ja ulkopinnan pintavastuksia.

HEAT 2 -ohjelmassa lämmönsiirto onteloissa pystytään ottamaan huomioon ”Frame cavity” -materiaalia käyttämällä [7, luku 9].

### 2.3 Uritetun teräsosan tehollisen lämmönjohtavuuden määrittäminen

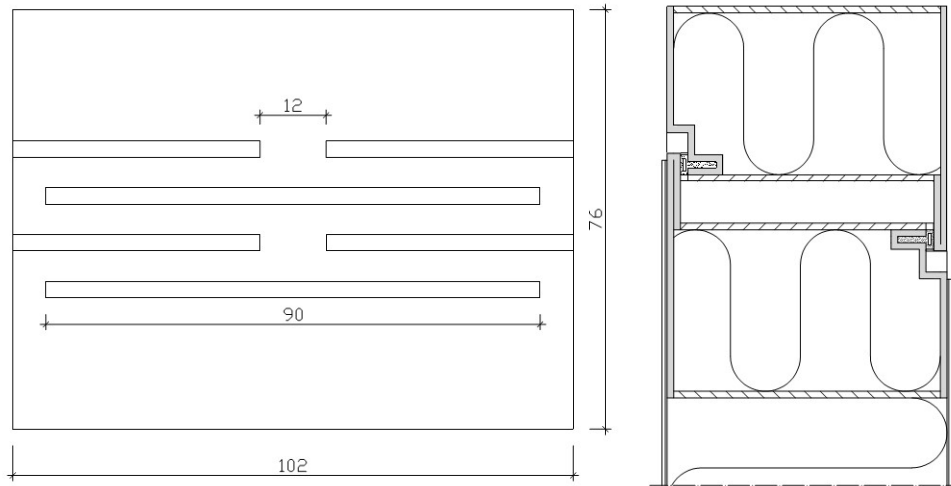
Teräs materiaalina johtaa lämpöä lävitseen huomattavasti paremmin kuin lämmöneristeiksi luokiteltavat materiaalit (esim.  $50 \text{ W}/(\text{mK}) / 0,04 \text{ W}/(\text{mK}) = 1250$ ). Lämmön siirtymistä rakenteen läpi voidaan hidastaa tekemällä lämmöneristeiden läpäiseviin teräsosiin uritus, jonka muoto vaikuttaa rakenteen läpi johtuvan lämpövirran määrään. Uritetut teräsosat on otettu laskelmissa huomioon teräsosan tehollisen lämmönjohtavuuden avulla.

Fourierin laista voidaan johtaa lauseke materiaalin lämmönjohtavuuden laskemiseksi, kun tunnetaan kappaleen läpi johtuvan lämpövirran tiheys, kappaleen paksuus sekä lämpötilaero. Tämä on esitetty kaavassa (2).

$$\lambda_{eff} = -q \frac{dx}{dT} = q \frac{x_2 - x_1}{T_1 - T_2} \quad (2)$$

missä  $\lambda_{eff}$  = tarkasteltavan kappaleen tehollinen lämmönjohtavuus (W/(mK)).

Lämpövirran tiheys  $q$  määritetään soveltuvalla laskentaohjelmalla, nyt esitettävissä laskelmissa on käytetty HEAT 2 -ohjelmaa. Esimerkit teräsosan urituskuviosta sekä ovi- ja karmiprofiilien liitoksesta on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Vasen: Esimerkki lämmöneristeen läpäisevän terösosan urituksesta. Oikea: Ovipaneelin ja karmin liitos. Tehollisen lämmönjohtavuuden alue on merkitty vinoviivoituksella.

Ovien putkiprofiileissa on taite niin, että yksittäisen putken vastakkaiset sivut lämmöneristeen läpi ovat hieman eripituiset. Kustakin eri uritustyypistä ja profiilin paksuudesta tehtiin erillinen laskentamalli, jonka avulla tehollinen lämmönjohtavuus määritettiin. Tehollista lämmönjohtavuutta käytettiin siinä suunnassa, jossa lämpövirta joutuu kulkemaan uraryhmän läpi. Poikittaisessa suunnassa käytettiin ehjän teräksen lämmönjohtavuutta 50 W/(mK).

Standardi [5] rajasi tehollisten lämmönjohtavuuksien käytön tilanteeseen, jossa laskettu tehollinen arvo on enintään 1,5-kertainen alkuperäisten materiaalien alhaisimpaan lämmönjohtavuuteen verrattuna. Tuulettumattoman ontelon tehollinen lämmönjohtavuus standardin [3] mukaisesti laskettaessa on samaa suuruusluokkaa tavallisten lämmöneristeiden lämmönjohtavuuksien kanssa. Uritetun terösosan tehollinen lämmönjohtavuus ei kuitenkaan ole näin alhainen, joten standardin [5] perusteella laskenta pitäisi tehdä kolmiulotteisena. Standardin [3] mukainen laskentamenetelmä on kuitenkin kaksiulotteinen, jolloin päädytään ristiriitaan.

Koska terösosan uritus on olennainen tekijä teräsovien U-arvoa laskettaessa, päädyttiin urituksen osalle käyttämään erikseen laskettua tehollisen lämmönjohtavuuden arvoa. Valintaa tukee se seikka, että lämpövirran tiheys on suurimmillaan nimenomaan viivamaisen terösosan läpi ja huomattavasti pienempi terösosan poikittaisessa suunnassa. Tällöin muun rakenteen geometriaa tai materiaalien ominaisuuksia ei muuteta. Ristiriita olisi kuitenkin hyvä saada poistetuksi tulevilla standardiversioissa.

## 2.4 Koko oven U-arvon laskenta

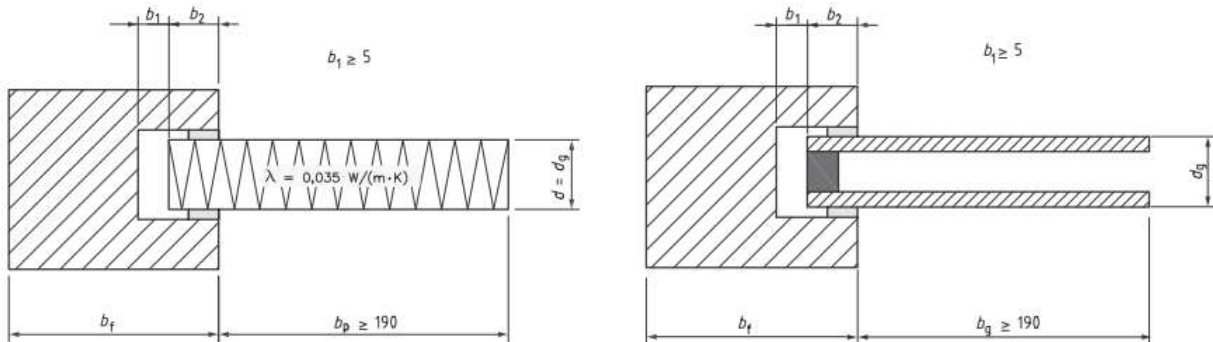
Standardin [2] mukaan koko oven U-arvo lasketaan kaavan (3) avulla.

$$U_D = \frac{\sum A_f U_f + \sum A_g U_g + \sum l_g \Psi_g}{\sum A_f + \sum A_g} \quad (3)$$

missä  $A_f$  = karmiprofiilin pinta-ala, m<sup>2</sup>  
 $U_f$  = karmiprofiilin U-arvo, W/(m<sup>2</sup>K)  
 $A_g$  = oven paneeliosan pinta-ala, m<sup>2</sup>

- $U_g$  = oven paneeliosan U-arvo, W/(m<sup>2</sup>K)  
 $l_g$  = karmiprofiilin ja paneeliosan välinen pituus, m  
 $\Psi_g$  = karmiprofiilin ja paneeliosan välinen viivamainen lisäkonduktanssi, W/(mK).

Paneeliosan U-arvo voidaan laskea suoraan standardin [4] mukaisesti. Karmin U-arvo sekä karmin ja paneeliosan välisen liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi määritetään kaksiosaisen laskennan avulla. Ensimmäisessä vaiheessa paneeliosa korvataan kokonaan lämmöneristelevyllä ( $\lambda = 0,035$  W/(mK)). Toisessa vaiheessa lasketaan lämpöhäviö todellisen rakenteen läpi. Nämä kaksi tapausta on esitetty kuvassa (2).



Kuva 2. Karmin U-arvon sekä karmin ja paneeliosan välisen kylmäsiirtotermin määrittämiseksi muodostettavat laskentamallit. Vasen: Karmin U-arvon määrittäminen. Oikea: Karmin ja paneeliosan välisen kylmäsiirtotermin määrittäminen. [3]. Mallinnetuissa rakenteissa lämmöneristelevy laitettiin alkamaan oven paneeliosan kohdalta (ei kuvaa).

Karmin U-arvo lasketaan kaavalla (4), joka liittyy kuvan (2) mukaiseen vasemmanpuoleiseen laskentamalliin.

$$U_f = \frac{L_f^{2D} - U_p b_p}{b_f} \quad (4)$$

- missä  $L_f^{2D}$  = lämpövirta koko lämmöneristepaneelirakenteen läpi yhden kelvin-asteen lämpötilaerolla, W  
 $U_p$  = lämmöneristepaneelin U-arvo, m  
 $b_p$  = lämmöneristepaneelin leveys rakennetta edestä päin katsottaessa, m  
 $b_f$  = karmin leveys rakennetta edestä päin katsottaessa, m.

Karmin ja ovipaneelin välinen viivamainen kylmäsiirta lasketaan kaavalla (5) (Kuva (2) oikea).

$$\Psi_g = L_\psi^{2D} - U_f b_f - U_g b_g \quad (5)$$

- missä  $L_\psi^{2D}$  = lämpövirta koko todellisen rakenteen läpi yhden kelvin-asteen lämpötilaerolla, W.

Sisäpinnan pintavastus on ollut laskennassa 0,13 m<sup>2</sup>K/W ja ulkopinnan pintavastus 0,04 m<sup>2</sup>K/W. Lämmönsiirto sisä- ja ulkopintojen onteloissa on laskettu standardin SFS-EN ISO 10077 mukaisesti, käyttäen hieman tuulettuvissa onteloissa ontelon tehollisen lämmönjohtavuuden

kaksinkertaista arvoa. Pintavastusten paikallinen kasvattaminen [3, liite B] arvioitiin vaikutukseltaan niin pieneksi, että se jätettiin pois laskelmista.

### 3. Eri tekijöiden vaikutuksista ovien U-arvoon

Lopullisten ovimallien tulee toteuttaa samanaikaisesti vaatimukset muun muassa lämmön- ja ääneneristyksestä sekä palonkestosta ja mekaanisesta kestävydestä. Näin ollen tuotteen valmistajan on tarpeen pystyä kontrolloimaan eri osatekijöiden optimointia.

Tehdyt laskelmat ovat osa ovien valmistajan T&K-prosessia, eikä yksityiskohtaisia tuloksia esitetä tässä yhteydessä.

#### 3.1 Eri lämpökatkotyyppien tehollinen lämmönjohtavuus

Lämmön johtumismatkan pidentäminen hidastaa lämmön kulkua uritetun teräsosan läpi ja näin ollen pienentää uritetun teräsosan tehollista lämmönjohtavuutta. Urituksen vaikutus riippuu sekä urien lämpövirran suuntaan poikittaisesta leveydestä, urien lukumäärästä sekä kannaksen pituudesta, mutta myös urien lämpövirran suuntaisesta etäisyydestä toisiinsa nähden.

Kaavan (2) perusteella tehollisen lämmönjohtavuuden arvo on suoraan verrannollinen sekä lämpövirran tiheyteen että rakenteen paksuuteen. Ehjä teräs johtaa lämpöä huomattavasti paremmin kuin uritettu osuus. Näin ollen laskennasta saatu uritetun teräsprofiilin tehollinen lämmönjohtavuus  $\lambda_{\text{eff}}$  kasvaa karmin paksuuden kasvaessa, vaikka lämpövirta osan läpi pysyisikin lähes samana. Toisin sanoen ehjän teräsosan pidentäminen ei juuri kasvata sen lämmönvastusta, vaan suurin vaikutus teräsosan teholliseen lämmönjohtavuuteen on siihen tehdyllä urituksella.

Uritetun teräsosan tehollinen lämmönjohtavuus tippuu ehjän teräksen arvosta 50 W/(mK) tasolle 2...11 W/(mK) urituksen tyypistä riippuen.

#### 3.2 Ovien rakenteellisista ratkaisuista

Kaavan (3) mukaisesti oven lämpöhäviöt muodostuvat oven paneeliosan lämpöhäviöistä ( $U_g A_g$ ), karmien sekä välilykisteiden lämpöhäviöistä ( $U_f A_f$ ) sekä paneeliosan ja profiilien välisestä viivamaisesta kylmäsillasta ( $\Psi_{g,l_g}$ ). Eri osien lämpöhäviöt lasketaan yhteen ja jaetaan koko oven pinta-alalle.

Oven paneeliosan U-arvo on tyypillisesti pienempi kuin oven karmien tai välilykisteiden kohtien U-arvo. Tästä syystä oven koolla on selvä vaikutus koko oven U-arvoon. Mitä suurempi ovi, sitä enemmän siinä on pienemmän U-arvon paneeliosaa suhteessa karmirakenteiden ja välilykisteiden määrään. Toisin sanoen mitä suurempi ovi, sitä helpompi sen on päästä alhaisempiin U-arvoihin pienempään oveen verrattuna.

Samalla pitää kuitenkin muistaa, että yksittäisiä rakennusosia pitää tarkastella myös kokonaisuuden kannalta. Jos ajatellaan ovien vaihtoehtona olevan seinää, niin lämpöhäviöt suuremman oven läpi saattavat kasvaa pientä ovea isommaksi, vaikka rakenteen U-arvo paranisikin. Näin ollen päädytään optimointitehtävään, jossa pitää tuntea muun muassa käytettäväksi suunnitellun oven U-arvo pinta-alan funktiona.

Oven lämmöneristys on myös tärkeä tekijä koko oven U-arvon muodostumisessa. Mitä paremmin lämmöneristetty ovi, sitä pienemmät ovat lämpöhäviöt sen läpi. Toisaalta pelkästä lämmöneristyksen kasvattamisesta saatava hyöty pienenee eristepaksuuden kasvaessa, siellä lämpöhäviöt rakenteen teräsosien kautta eivät juuri pienene, vaikka niiden pituus kasvaisikin (vrt. luku 3.1). Teräsosien kautta tapahtuvat lämpöhäviöt muodostavat siis tietyn perustason oven lämpöhäviöille. Koko oven U-arvon pienentäminen edellyttää eri osien optimointia kokonaisuuden kannalta järkevällä tavalla.

Lämmöneristekerroksen läpäisevien teräsosien urituksen yhtenä vaihtoehtona on putkiprofiilien korvaaminen esimerkiksi C-profiileilla. Tällöin etuna saavutetaan lämpöä johtavien teräsosien osittainen poistaminen kokonaan, mutta toisaalta rakenteen lujuutta saatetaan joutua kompensoimaan muilla menetelmillä. Tehokkaasti uritetun putkiprofiilin ja C-profiilin käytöllä ei alhaisen U-arvon ovissa ole enää suurta eroa lämpöhäviöiden kannalta, vaan valinta voidaan tehdä muilla perusteilla.

Teräsprofiilien ainevahvuuden kasvattaminen lisää yksittäisen teräsosan läpi johtuvan lämpöenergian määrää, joissakin tilanteissa tällä saatetaan mahdollistaa esimerkiksi tehokkaampi uritus tai jopa eri profiilin käyttö. Tällöin muutokset koko rakenteen toteutuksessa kompensoivat yksittäisen teräsosan läpi johtuvan lämpöhäviön määrän.

Eri ratkaisuja yhdistelemällä yksilehtisen teräsoven U-arvo alittaa tällä hetkellä voimassa olevan lämpimien tilojen ulko-ovien U-arvon vertailuarvon  $1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

#### 4. Yhteenveto

Teräsrakenteisten ovien U-arvon parantamiseen on olemassa useita keinoja. Ovien U-arvoa pienentävät profiilien sekä umpiosan lämmöneristys ja lämmöneristyksen lisääminen, putkiprofiilien korvaaminen C-profiileilla sekä lämmöneristeen läpäisevien teräsosien uritus sekä oven pinta-alan kasvattaminen. Teräsosan läpi johtuvan lämpövirran kannalta uritus muodostaa suurimman osan teräsosan lämmönvastuksesta, kun taas teräsosan pituuden kasvattaminen lämpövirran suunnassa ei juuri pienennä lämpövirtaa teräksen läpi. Ehjään teräkseen verrattuna putkiprofiilin korvaaminen C-profiililla pienentää oven U-arvoa tehokkaasti, mutta vaikutus on sitä pienempi, mitä tehokkaampi uritus teräsosassa ennestään on.

U-arvolaskennan toteutus on standardoitu, jolloin tulosten vertailtavuus on hyvä. Toisaalta taas standardien mukaiset laskentamenetelmät olettavat muun muassa nimellimitat ja materiaalien ideaalisen kontaktin, mitkä ovat yksinkertaistuksia todellisuudesta. Myös ovien nurkkien kolmiulotteinen lämmönjohtuminen sekä oven ja ympäröivän rakenteen liitoksen vaikutus on jätetty tarkastelusta pois. Standardien mukainen laskentamenetelmä voidaan siten nähdä tavoitteena yhdistää kohtuullinen laskentatyö sekä riittävän tarkat laskentatulokset.

#### Lähdeluettelo

- [1] SFS-EN ISO 12567-1 (2010) Thermal performance of windows and doors. Determination of thermal transmittance by the hot-box method. Part 1: Complete windows and doors. Finnish standards association SFS, Helsinki.
- [2] SFS-EN ISO 10077-1 (2006) Thermal performance of windows, doors and shutters. Calculation of thermal transmittance. Part 1: General. Finnish standards association SFS, Helsinki.

- [3] SFS-EN ISO 10077-2 (2012) Thermal performance of windows, doors and shutters. Calculation of thermal transmittance. Part 2: Numerical method for frames. Finnish standards association SFS, Helsinki.
- [4] SFS-EN ISO 6946 (2008) Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method. Finnish standards association SFS, Helsinki.
- [5] SFS-EN ISO 10211(2007) Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations. Finnish standards association SFS, Helsinki.
- [6] Blomberg, T. 1996. Heat conduction in two and three dimensions. Computer modelling of building physics applications. PhD thesis. Report TVBH-1008. ISBN 91-88722-05-8. Department of Building Physics, Lund University, Sweden. (Saatavilla osoitteesta [www.buildingphysics.com](http://www.buildingphysics.com), viitattu 19.8.2013)
- [7] Blomberg, T. 2000. Heat 2 – A PC-program for heat transfer in two dimensions – Manual with brief theory and examples. Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics. (Saatavilla osoitteesta [www.buildingphysics.com](http://www.buildingphysics.com), viitattu 19.8.2013)