

Jyri Nieminen & Mikael Salonvaara

Hygrothermische prestaties van lichte staalskeletwanden



Hygrothermische prestaties van lichte staalskeletwanden

Jyri Nieminen, Mikael Salonvaara

VTT Bouwtechnologie



ISBN 951-38-5772-7 (gebonden) ISSN
1235-0605 (gebonden)

ISBN 951-38-5773-5 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 2000

JULKAISIJA - UTGIVARE - UITGEVER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technisch Onderzoekscentrum van Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT,
Finland telefoon internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka,
Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 455 2408

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsfysik, hus- och brandteknik,
Värmemansgränden 3, PB 1804, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 455 2408, (09) 456 4709

VTT Gebouwenteknologie, Bouwfysica, Gebouwentekniek en Brandweertekniek,
Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland
telefoon internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 2408, 358 9 456
4709

Technische redactie Leena Ukskoski

Otamedia Oy, Espoo 2001

Nieminen, Jyri & Salonvaara, Mikael. Hygrothermische prestaties van lichte staalskeletwanden. Espoo 2000. Technisch Onderzoekscentrum van Finland, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Onderzoeksnotities 2070. 26 p.

Trefwoorden gebouwschil, staalconstructies, lichtmetaal, corrosietests, weerbestendigheid, vocht, oppervlaktecondensatie, klimatologische omstandigheden, warmteoverdracht

Abstract

De hygrothermische prestaties van een nieuw lichtmetalen gebouwschilsysteem met stalen frame zijn geanalyseerd met behulp van 3-D thermische simulaties, 2-D gecombineerde warmte-, lucht- en vochtoverdrachtsimulaties, laboratoriumtests in een gekalibreerde en bewaakte warmhoudkast (ISO 8990), weerbestendigheidstests voor constructies op ware grootte, corrosietests en veldmetingen in experimentele gebouwen in Ylöjärvi, Centraal-Finland. De resultaten tonen aan dat een moderne stalen wandconstructie op basis van geperforeerde stalen profielen bevredigend presteert in het koude klimaat van Finland. De perforaties verminderen het warmteverlies langs het profiel aanzienlijk. De veldmetingen tonen aan dat er geen condensatie is opgetreden in het kozijnsysteem. Temperatuurmetingen en infraroodonderzoeken in demonstratiegebouwen tonen aan dat de oppervlaktetemperaturen voldoende hoog zijn om oppervlaktecondensatie of zelfs een verhoogde vochtigheid op het oppervlak te voorkomen. Volgens de berekeningen zijn er geen ernstige corrosierisico's in de stalen frames in het Finse klimaat. Het klimaat heeft echter een belangrijk effect op de prestaties en bij het ontwerp van de constructies moet rekening worden gehouden met de klimatologische omstandigheden.

Voorwoord

In Finland zijn de afgelopen 10-15 jaar nieuwe bouwschilsystemen ontwikkeld en bestudeerd op basis van lichte staalconstructies. De focus van het onderzoek lag op de hoogwaardige buitenwandsystemen. Goede thermische isolatie-eigenschappen, duurzaamheid en minimale corrosie- en vochtrisico's waren de belangrijkste punten.

In de periode 1989-2000 is een aantal onderzoeksprojecten uitgevoerd. Dit rapport geeft een overzicht van de belangrijkste resultaten van deze onderzoeken. Het onderzoekswerk is gefinancierd door Rautaruukki Oyj, Outokumpu Polarit Oy, de Finse vereniging voor bouwstaal, het nationale technologieagentschap (Tekes), het staalonderzoeksprogramma van VTT en de Europese Gemeenschap voor Kolen en Staal (EGKS).

Inhoud

Abstract	3
Voorwoord.	4
1. Inleiding.....	7
2. Thermische prestaties van lichte staalconstructies	8
2.1 Thermische bruggen.....	8
2.2 Vergelijking van hulpmiddelen voor thermische analyse.....	12
2.3 Luchtdichtheid van stalen gebouwen.....	14
2.4 Temperatuurverdeling in lichtmetalen wanden	14
3. Duurzaamheid van lichte staalconstructies.....	17
3.1 Vochtvariatie in staalskeletbouw wanden	17
3.2 Corrosierisico's veroorzaakt door materialen die in contact komen met lichtmetaal	17
3.3 Hygrothermische simulaties.....	19
4. Samenvatting	23
Referenties.....	25

1. Inleiding

De afgelopen 10-15 jaar zijn er nieuwe bouwsystemen ontwikkeld op basis van lichte staalconstructies. De nadruk lag op commerciële en openbare gebouwen, maar het gebruik van staalconstructies in woningen is ook toegenomen. De levensduur van gebouwen en bouwcomponenten wordt steeds belangrijker bij de marketing van bouwproducten. Wanneer nieuwe bouwsystemen worden geïntroduceerd, zal de vraag naar de hygrothermische prestaties onvermijdelijk aan de orde komen.

Het doel van het onderzoek was het evalueren van de hygrothermische prestaties en duurzaamheid van een licht staalskeletbouwsysteem dat gebruikt wordt als buitenmuurconstructie in verschillende soorten gebouwen. Er zijn een aantal onderzoeksprojecten afgerond om echte, geteste en geverifieerde resultaten te laten zien op het gebied van prestaties:

- Ontwikkeling van lichte prefab gevelelementen met stalen frame: Ontwikkeling en hygrothermische testen van nieuwe lichte staalskeletbouwsystemen /15/.
- Ontwikkeling 3-D warmteoverdrachthulpmiddelen voor staalconstructies: numeriek 3-D hulpmiddel voor berekening van temperatuur en warmtestroomverdeling in staalconstructies /10/.
- Ontwerp van de levensduur van staalconstructies: veldonderzoeken van stalen gebouwen, corrosietests op lange termijn /6/.
- VTT Steel research programme's /16/ project Performance of steel buildings: development hygrothermal calculation tools, measuring devices and methods.
- EGKS (Europese Coalitie voor Kolen en Staal) Mega5-project Toepassing van staal in stedelijke habitats: Energiezuinige stalen woning voor een koud klimaat: ontwikkeling, testen en demonstratie van een nieuw staalskeletbouwsysteem, concept voor energiezuinige woningen op basis van staalskeletbouw /7, 11/.

Een nieuw concept voor staalconstructies gebaseerd op geperforeerde lichtmetalen profielen werd ontwikkeld en gedemonstreerd in Ylöjärvi, Centraal Finland. Het doel van het door de EGKS gefinancierde Mega5-project /7/ was het waarborgen van de prestaties en geschiktheid van een lichtmetalen huis met stalen skelet voor gebruik in een koud klimaat. Het project omvatte uitgebreid onderzoek naar de structurele en hygrothermische prestaties van de constructies, evenals onderzoek naar de energieprestaties en milieueffecten van stalen gebouwen.

De hygrothermische prestaties van een aantal constructies zijn beoordeeld aan de hand van driedimensionale warmtestroomberekeningen en laboratoriummetingen met constructies op ware grootte in een gekalibreerde en bewaakte warmhoudkast volgens de ISO 8990-norm en weerbestendigheidstests in het laboratorium. De thermische prestaties van de constructies werden ook onderzocht tijdens de veldmonitoring (1996-2000) in de stalen huizen van Ylöjärvi. Het monitoringsproject omvatte temperatuurmetingen op verschillende locaties in de gebouwschil, infraroodonderzoeken van de gebouwen, blowerdoortests om de luchtdichtheid van de gebouwen te beoordelen en vochtmonitoring van de frameconstructie.

In het VTT Staalonderzoeksprogramma's /16/ onderzoeksproject 'Prestaties van stalen gebouwen' is de nauwkeurigheid van verschillende meetmethoden en geautomatiseerde berekeningstools getest. De focus van het onderzoek lag op thermische metingen en

berekeningen.

2. Thermische prestaties van lichte stalen constructies

2.1 Thermische bruggen

Net als alle kozijnmaterialen in een geïsoleerde constructie is een stalen element een koudebrug. Maar omdat het warmtegeleidingsvermogen van staal hoog is, zijn ernstige bruceffecten mogelijk. Het effect van koudebruggen is met drie methoden verminderd:

- dubbele framesystemen gebruiken
- het gebruik van buitenisolatiesystemen
- met geperforeerde (of gegroefde) stalen profielen.

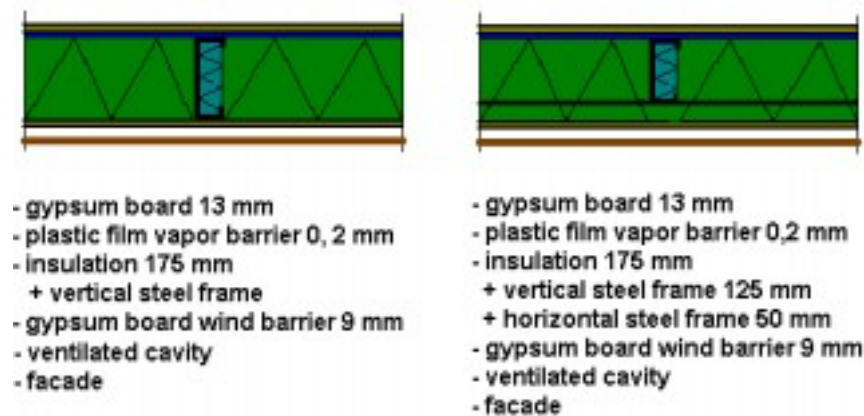
Lichte staalconstructies op basis van een dubbel kozijnsysteem (horizontaal en verticaal kozijn, Afbeelding 1) worden gebruikt als buitenmuren van kantoorgebouwen en openbare gebouwen. De afstand tussen de frames in beide richtingen is meestal 0,6 meter en in de holtes tussen de frames wordt thermische isolatie aangebracht. Een dubbel kozijnsysteem verbetert de thermische kwaliteit van een muur met 20-25% in vergelijking met een enkel kozijn met spouwisolatie, Tabel 1.

Buitenisolatiesystemen verminderen de koudebruggen in een muur. Het effect hangt af van de thermische eigenschappen van het isolatiesysteem. Buitenisolatie is zeer voordelig op het gebied van vochtgedrag, omdat de kozijntemperaturen toenemen, wat op zijn beurt het vochtrisico in het kozijn vermindert.

Geperforeerde spanten in een licht stalen frame bieden twee voordelen voor de constructie. Dankzij de perforaties zijn de thermische eigenschappen van de constructie verbeterd. Dit maakt het op zijn beurt haalbaar om de constructie te gebruiken als een enkelwandig wandsysteem. Een licht stalen frame met geperforeerde spanten wordt een thermoprofiel genoemd, zie figuren 2 en 3. U-vormige thermoprofielen worden gebruikt in geprefabriceerde gevelementen voor hoogbouw. De dragende muren van vrijstaande huizen en rijtjeshuizen bestaan uit verticale C-vormige thermoprofielen. De materiaaldikte van de profielen is meestal 1,0-1,5 mm.

Het effect van de perforaties of gleuven in een thermoprofiel kan in rekening worden gebracht door een equivalent warmtegeleidingsvermogen in te voeren voor het niet-geperforeerde materiaal. Warmteoverdracht in de baan kan worden verondersteld pure warmtegeleiding te zijn. De equivalente thermische geleidbaarheid kan gedefinieerd worden door de geleiding in het geperforeerde geval te vergelijken met die in het ongeperforeerde geval. De equivalente warmtegeleiding hangt af van het perforatiesysteem, inclusief de vorm en afmetingen van de perforaties, de afmetingen van de stalen halzen tussen de perforaties en de warmtegeleiding van het materiaal in de perforaties, zie figuur 4.

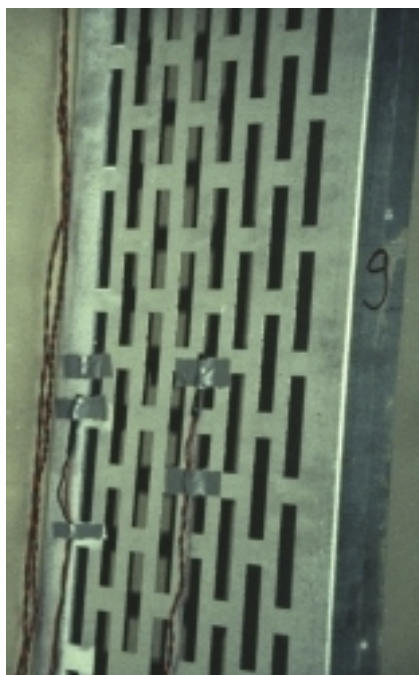
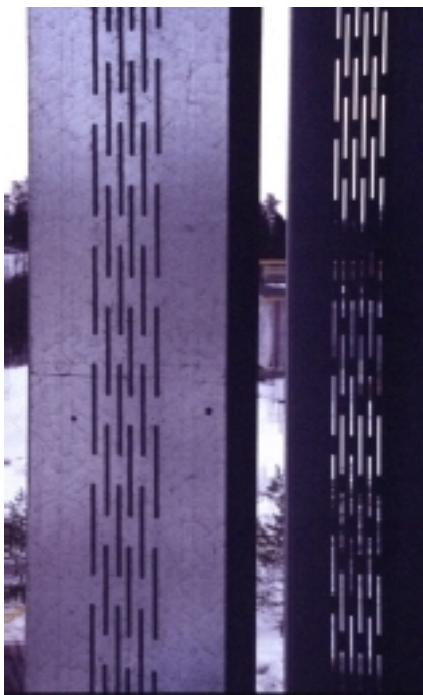
De verminderde koudebrug heeft een aanzienlijk effect op de vermindering van de warmtegeleiding in het thermoprofiel ten opzichte van massief staal (afbeelding 5). De perforaties fungeren als thermische onderbrekingen voor het stalen element waardoor de warmtegeleiding langs de staalplaat met 70-80% wordt verminderd (afbeelding 6). Volgens studies uitgevoerd in Finland en Zweden /1, 8, 9/ kan de equivalente warmtegeleiding van een thermoprofiel 5-10 W/m² K bedragen.



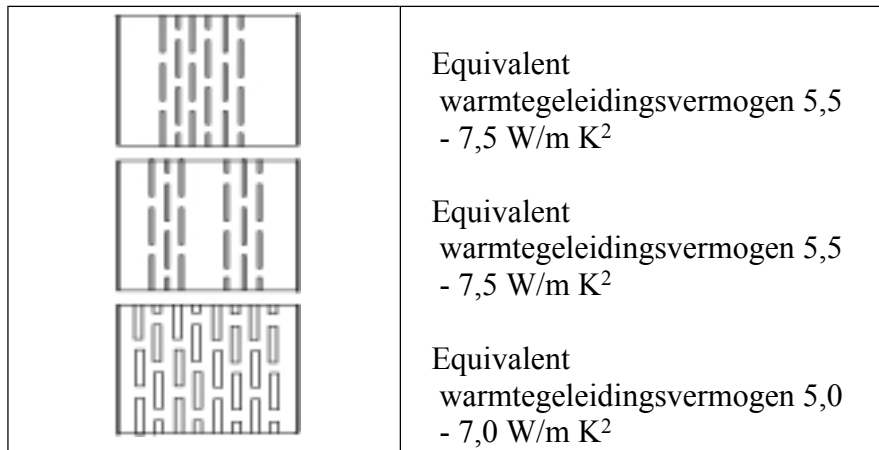
Afbeelding 1. Enkel- en dubbelwandige constructies gebruikt als buitenmuur in Finland.

Tabel 1. Relatieve warmteweerstand van geïsoleerde staalframewand vergeleken met de eendimensionale weerstand van thermische isolatie van overeenkomstige dikte. Alle isolatiematerialen minerale wol, warmtegeleidingsvermogen 0,037 W/mK.

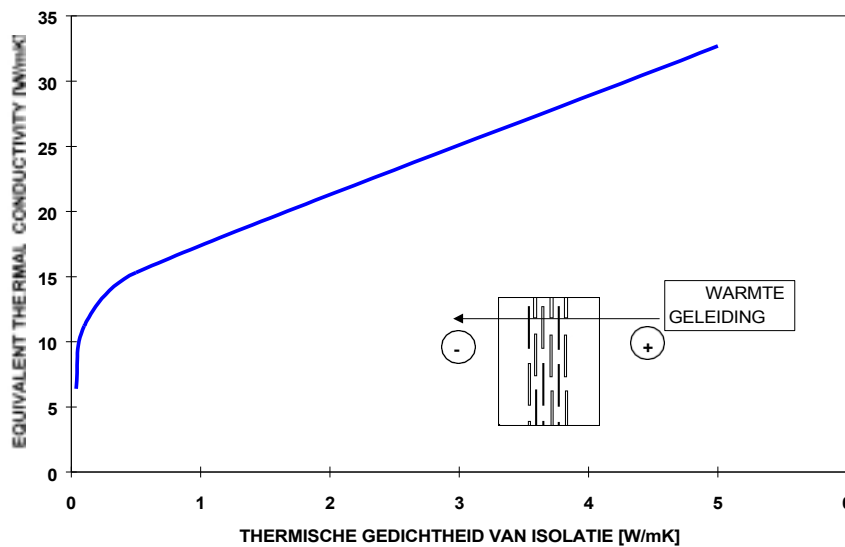
Muurstructuur	Relatieve warmteweerstand, %
Minerale wolisolatie 175 mm	100
Wand met enkel kozijn (afbeelding 1) - verticaal frame C 175-50-1.2	45
Dubbele framewand ■ verticaal frame C 125-50-1.2 ■ horizontaal frame Z 50-50-1,0	65
Enkel kozijn + buitenisolatie 125+50 mm - verticaal frame C 125-50-1.2	75
Wand met enkel frame, thermoprofielen - verticaal frame C 175-50-1.2	80



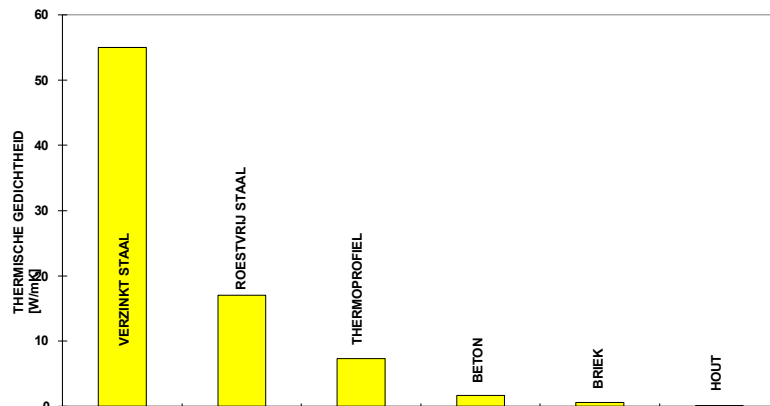
Figuur 2. Alternatieven voor thermoprofielen. Profielen in de bovenste rij zijn gebruikt in Villa 2000 gebouwd voor de Tuusula woonbeurs 2000 (links), en in Ylöjärvi stalen huizen gebouwd voor de Ylöjärvi woonbeurs 1996 (rechts). De andere twee exemplaren zijn gemaakt voor testdoeleinden.



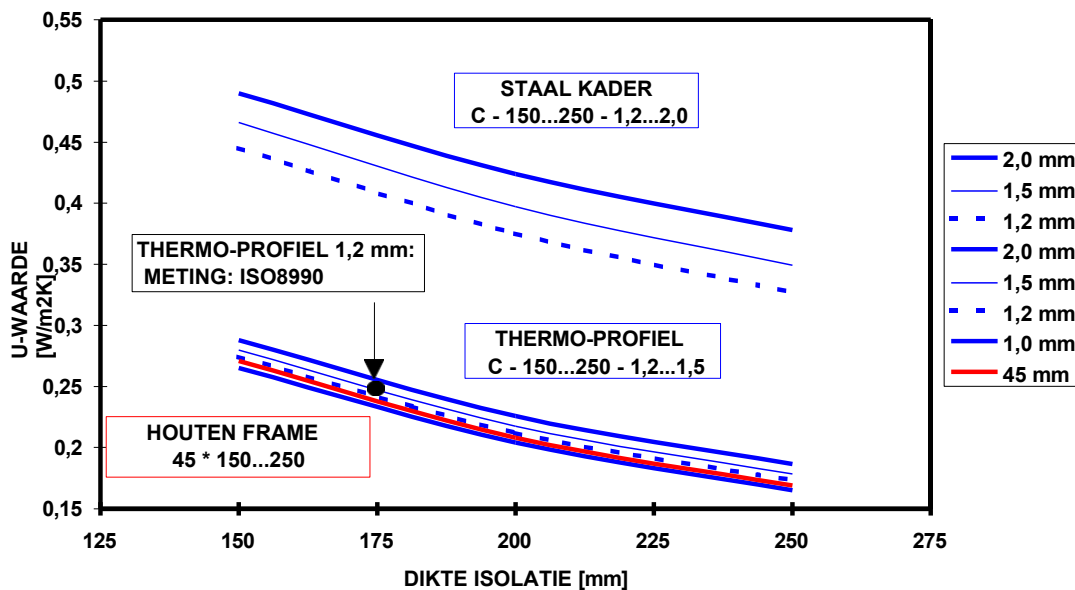
Afbeelding 3. Perforatiealternatieven van een thermoprofiel. Het equivalente warmtegeleidingsvermogen houdt rekening met de perforaties gevuld met isolatiemateriaal. Het equivalente warmtegeleidingsvermogen hangt af van de eigenschappen van de thermische isolatie, de afmetingen van de perforaties en de afmetingen van het massieve staal tussen de perforaties.



Figuur 4. Het effect van thermische isolatie op de equivalente thermische geleidbaarheid van het typisch Finse thermoprofiel /12/.



Afbeelding 5. Warmtegeleidingscoëfficiënt van verschillende bouwmaterialen gebruikt in dragende constructies. Equivalent warmtegeleidingsvermogen voor het thermoprofiel.



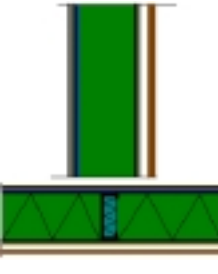
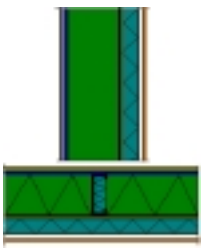
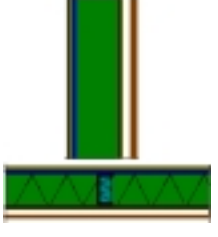
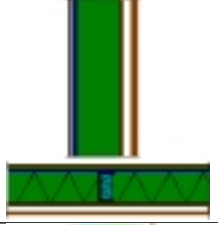
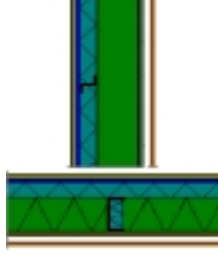
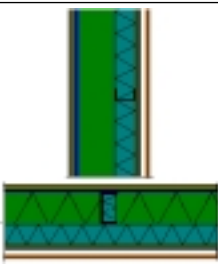
Afbeelding 6. Berekende waarden van de warmtedoorgangscoefficiënt voor staalskeletbouw en houtskeletbouw /9/. Het thermische voordeel van de perforaties in een stalen ligger van een enkel skelet is 40-50%, afhankelijk van de isolatiedikte van de muur.

2.2 Vergelijking van thermische analyse tools

Staalconstructies zijn meestal 3-dimensionale constructies. De thermische analyse van deze constructies is gecompliceerd, omdat er meestal numerieke methoden voor 3-dimensionale berekeningen nodig zijn. Constructies met een enkel frame kunnen echter worden geanalyseerd met 2-dimensionale berekeningen, zelfs als de staalplaat van een staalprofiel geperforeerd is, met behulp van equivalente thermische geleidbaarheid als materiaaleigenschap voor het staalement.

Om de nauwkeurigheid van berekeningsmethoden in vergelijking met metingen te vergemakkelijken, werd een reeks laboratoriumtests uitgevoerd in gekalibreerde en bewaakte hotboxapparaten (ISO 8990, /3/). Verder werd de geschiktheid van de warmtestromingsmethode volgens DIN 52611 norm /2/ voor het meten van de warmtedoorgangscoefficiënt getest. De resultaten laten zien dat de overeenkomst tussen de berekende en gemeten (ISO 8990) resultaten vrij goed is, Tabel 2. Hoewel er slechts enkele constructies zijn getest, laat de warmtestromingsmethode volgens DIN 52611 te hoge waarden zien in vergelijking met andere analysemethoden.

Tabel 2. Vergelijking van de thermische analyse-instrumenten voor de beoordeling van de warmtedoorgangscoefficiënt (U-waarde) van lichte staalskeletwanden. Gemeten waarden volgens ISO 8990 en DIN 52611 normen en resultaten van 2- en 3-dimensionale simulaties.

Type wand	Structuurlagen van binnenuit	U-waarde [W/m ² K]
	Gipskarton 13 mm PE-folie dampscherm Stalen frame a) TC 175-50-1,2 mm of b) C 175-50-1,2 mm + minerale wolisolatie Gipskarton winddicht 9 mm	a) ISO 8990: 0,263 3D-simulatie: 0,257 2-D simulatie: 0,257*) b) 3D-simulatie: 0,435 2-D simulatie: 0,435 *)equivalent thermisch geleidingsvermogen 7,3 W/mK
	Gipskarton 13 mm PE-folie dampscherm Stalen frame TC 175-50-1,2 mm + minerale wolisolatie Gipskarton winddicht 9 mm Windvaste harde minerale wol 45 mm	ISO 8990: 0,188 3D-simulatie: 0,190 2-D simulatie: 0,190 *) *)equivalent warmtegeleidingsvermogen 7,3 W/mK
	Gipskarton 13 mm PE-folie dampscherm Stalen frame TU 150-50-1,0 mm + minerale wolisolatie Gipskarton winddicht 9 mm	ISO 8990: 0,300 DIN 52611: 0,350 3D-simulatie: 0,292 2-D simulatie: 0,290*) *)equivalent thermisch geleidingsvermogen 5,5 W/mK
	Gipskarton 13 mm PE-folie dampscherm Zaagloos stalen frame U 150-50-1,0 mm + minerale wolisolatie Gipskarton winddicht 9 mm	ISO 8990 DIN 52611: 0,375 3D-simulatie: 0,340 2-D simulatie: 0,340
	Gipskarton 13 mm PE-folie dampscherm Stalen frame U 50-50-1,0 mm + minerale wolisolatie Stalen frame U 125-50-1,0 mm + minerale wolisolatie a) luchtspleet + beklede stalen gevel b) geen gevel	a) ISO 8990: 0,281 3D-simulatie: 0,282 b) DIN 52611: 0,345*) 3D-simulatie: 0,321*)
	Gipskarton 13 mm PE-folie dampscherm Stalen frame U 150-50-2,0 mm + minerale wolisolatie Stalen frame TU 100-50-1,0 + minerale wolisolatie Gipskarton winddicht 9 mm	ISO 8990: DIN 52611: 0,225 3D-simulatie: 0,214 3-D simulatie: 0,210*) *)equivalent warmtegeleidingsvermogen 16 W/mK

TC = C-vormig geperforeerd stalen profiel (thermoprofiel)

TU = U-vormig geperforeerd stalen profiel, U = U-vormig stalen profiel

2.3 Luchtdichtheid van stalen gebouwen

De luchtdichtheid van stalen gebouwen is slechts in 4 gevallen getest. Tabel 3 toont resultaten van gemeten gevallen en referentie-informatie van typisch Finse gebouwen.

Tabel 3. Luchtdichtheid van stalen huizen en typische Finse gebouwen.

Type gebouw	Luchtlekkage bij 50 Pa, luchtwisselingen per uur
Geprefabriceerde stalen huizen (rijtjeshuizen)	1,9-2,5
Op locatie gebouwd stalen huis (rijtjeshuis)	3
Op locatie gebouwde houten vrijstaande huizen	3-4
Geprefabriceerde houten vrijstaande huizen	2-4
Geprefabriceerde houten rijtjeshuizen	3-5
Massieve houten huizen (blokhutten)	7-15
Betonnen gebouwen	1-4
Energiezuinige vrijstaande huizen	0,8-2

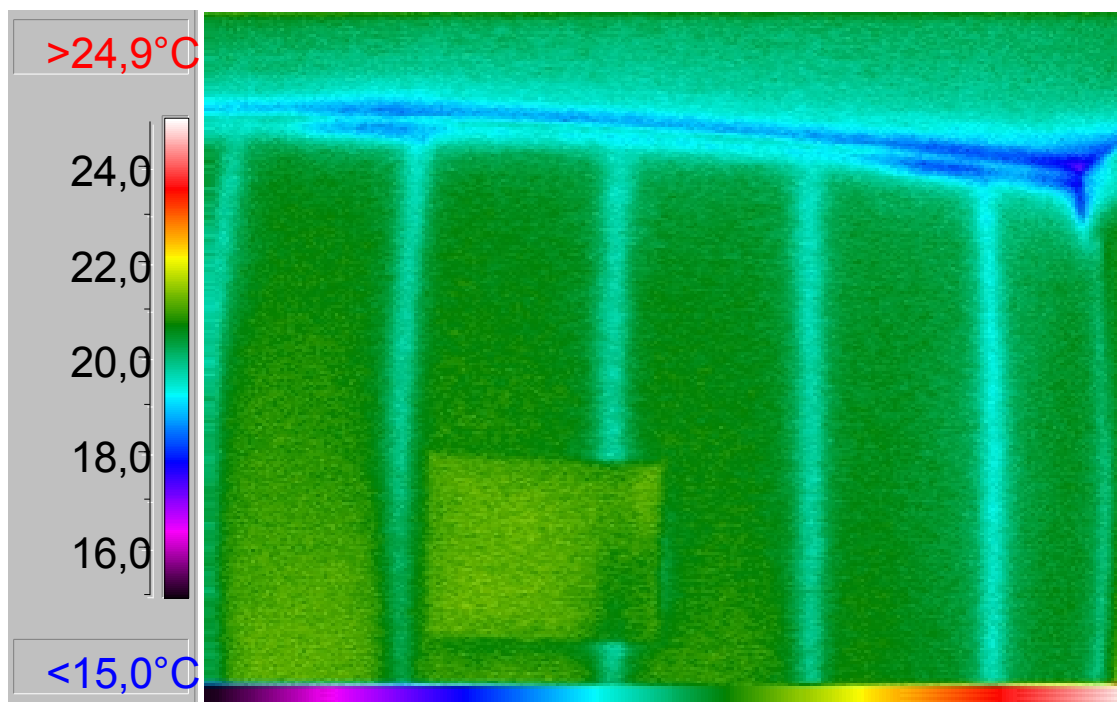
De locaties van luchtlekken in de stalen huizen werden opgezocht met een infraroodcamera. Onvoldoende afdichting van elektrische en ventilatie-installaties die door de lucht/dampbarrière van de schil lopen, veroorzaakte de meeste luchtlekken. Deze gebreken werden systematisch aangetroffen in alle gebouwen.

2.4 Temperatuurverdeling in lichtmetalen wanden

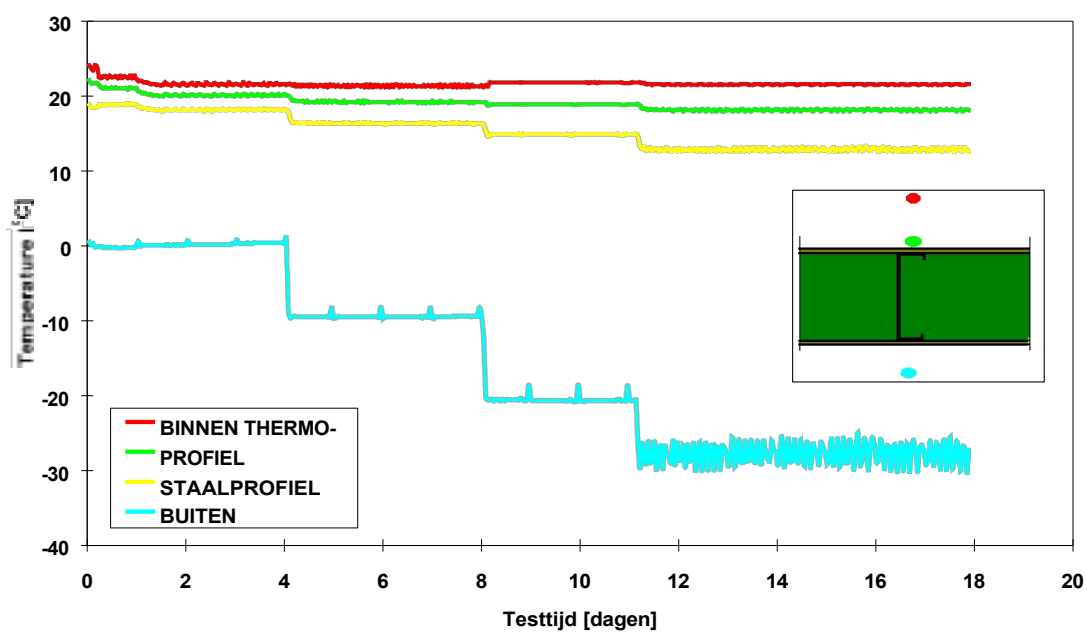
De temperatuurverdeling in de enkelvoudige skeletconstructies is gemeten in een reeks laboratoriumweertests op ware grootte en in de constructies van de stalen huizen van Ylöjärvi. De temperaturen aan de binnenkant van de muren zijn hoog genoeg om ghosting, oppervlaktecondensatie of zelfs een relatieve vochtigheid te voorkomen die hoog genoeg is om het risico van schimmelgroei op het muuroppervlak te vergroten (figuren 7 en 8). De temperatuur aan de binnenkant van de muur bovenop het kozijn is 1-2 °C lager dan de temperatuur tussen de kozijnen.

De temperatuur van de buitenflens van het stalen frame is afhankelijk van de thermische eigenschappen van de wand buiten het frame, Afbeelding 9. De buitenflens van het profiel is aanzienlijk warmer dan de buitenluchttemperatuur door warmtegeleiding van binnenuit langs de staalplaat van het profiel. Hoewel de perforaties in een thermoprofiel de warmtegeleiding langs het kozijn verminderen, verhoogt de restgeleiding de

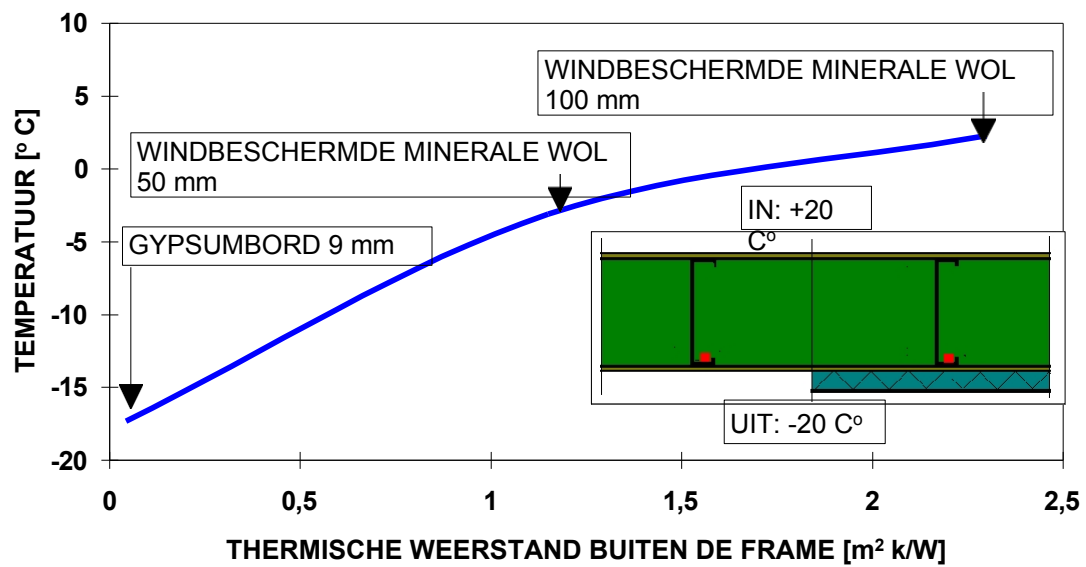
temperaturen in de buitenste delen van het kozijn, waardoor het risico op condensatie afneemt en het droogpotentieel in geval van condensatie toeneemt. Het gebruik van waterdampdoorlatende isolatie aan de buitenkant, zoals in de lage-energie wand, verbetert de hygrothermische prestatie van de wand nog verder.



Afbeelding 7. Infraroodbeeld van een stalen wand.



Afbeelding 8. Oppervlaktetemperaturen van een lichte staalskeletwand volgens een weerproef in het laboratorium.



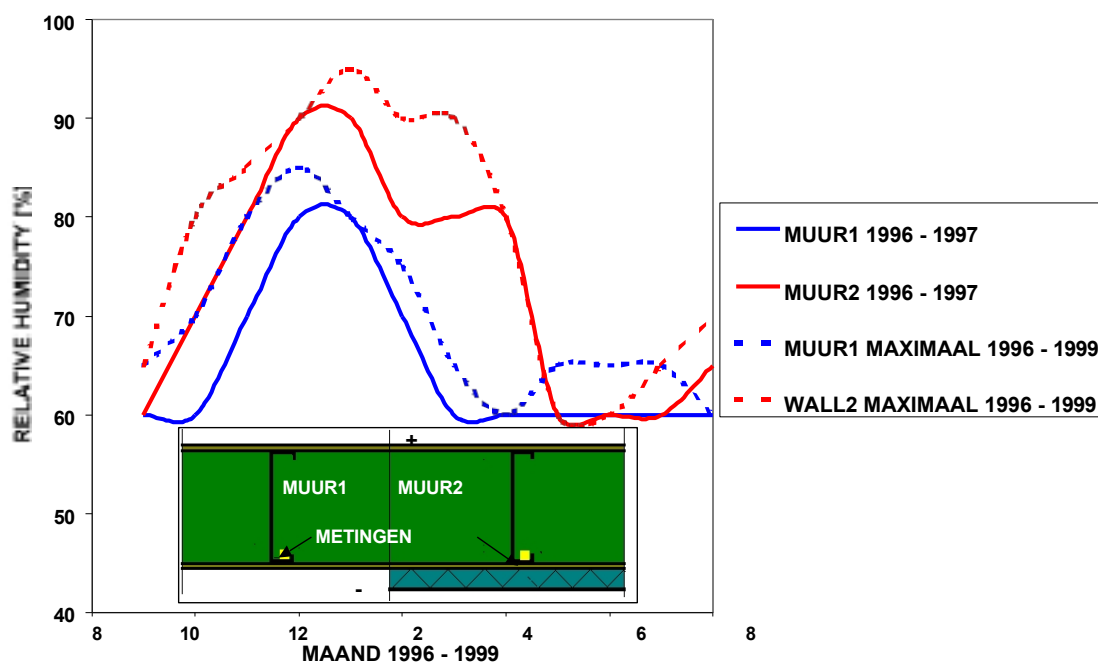
Figuur 9. Het effect van thermische eigenschappen van winddichtheid (zie afbeelding 1) op de temperatuur van de buitenste delen van het kozijn /12/.

3. Duurzaamheid van lichte staalconstructies

3.1 Vochtvariatie in staalskeletmuren

De corrosie van een metaal hangt af van het microklimaat op het oppervlak van een onderdeel. Continue corrosie is mogelijk als de relatieve vochtigheid op het metaaloppervlak hoger is dan 80% op hetzelfde moment dat de temperatuur hoger is dan 0°C (ISO 9223, /4/).

Figuur 10 toont de maandelijkse maximale waarden van de relatieve vochtigheid van acht meetpunten in de buitenflens van de stalen profielen, gemeten in de Ylöjärvi stalen huizen. De resultaten laten zien dat de relatieve vochtigheid in wand 1 hoger was dan 80%, maar dat er geen condensatie optrad. De luchtvochtigheid in wand 2 is niet hoger dan 90%.



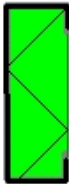
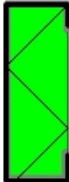
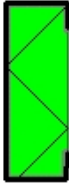
Afbeelding 10. Maandelijkse maximum relatieve vochtigheid in de buitenmuren van de Ylöjärvi stalen gebouwen. Metingen op de buitenflens van de stalen balken.

3.2 Corrosierisico's veroorzaakt door materialen die in contact komen met lichtmetaal

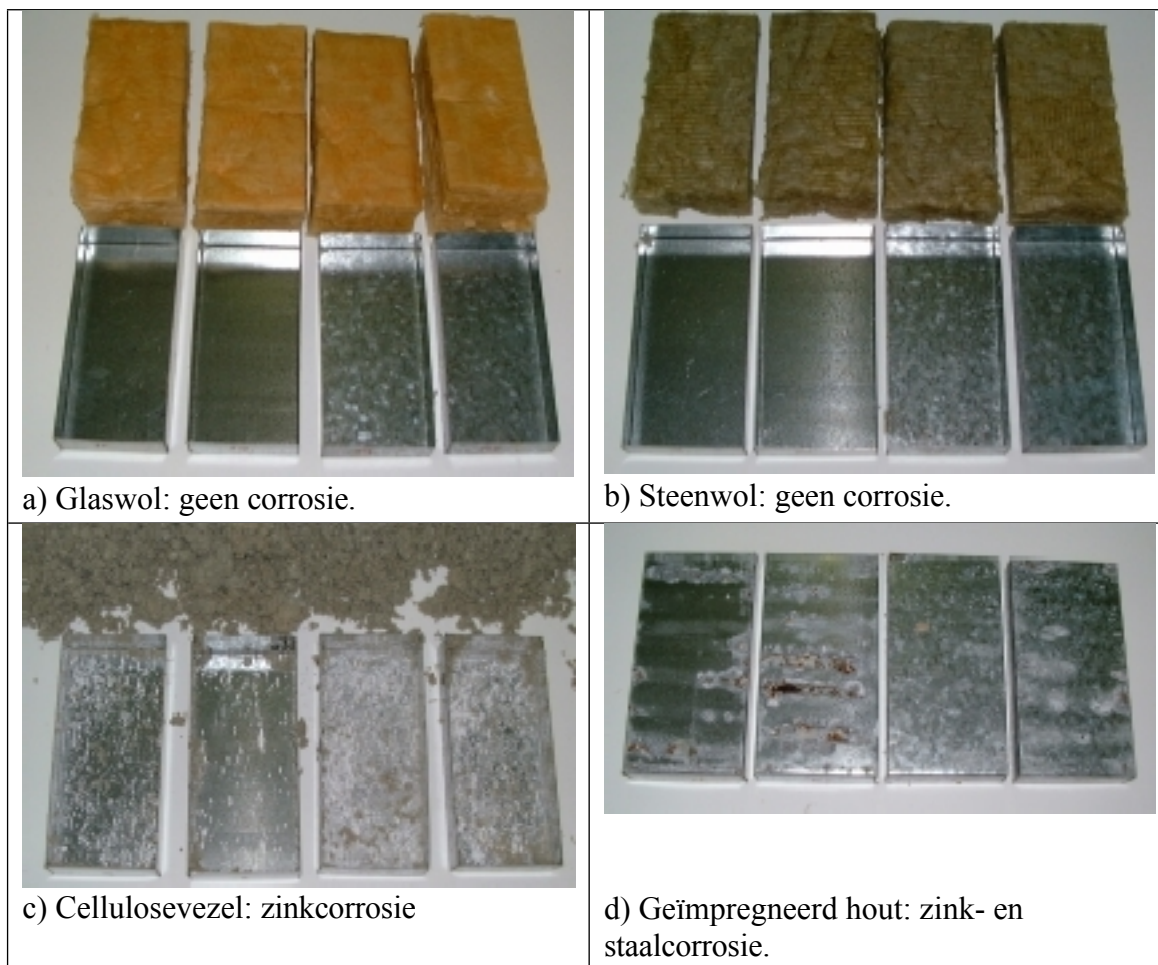
Corrosierisico's veroorzaakt door andere bouwmaterialen in contact met staal worden bestudeerd in een doorlopende langetermijnlaboratoriumtest. Geïsoleerde stalen frames worden in verschillende klimaten geplaatst om het effect van materiaal en luchtvochtigheid op corrosie te bekijken. De bestudeerde materialen zijn:

- cellulosevezelisolatie
- isolatie van glaswol
- steenwol isolatie
- geïmpregneerd hout.

De laboratoriumtest heeft ongeveer 4 jaar geduurd (35000 uur nattigheid). De testomstandigheden worden weergegeven in figuur 11. De resultaten tonen aan dat de cellulose-isolatie en het geïmpregneerde hout zinkcorrosie bevorderen in vochtige omstandigheden, maar er werden geen staalcorrosieproducten gedetecteerd in de testobjecten (afbeelding 12). Er zijn geen tekenen van zinkcorrosie in de proefstukken geïsoleerd met minerale wolproducten. In het geval met voortdurende condensatie werd randcorrosie van staal aangetroffen in alle proefstukken. De brandvertragende chemicaliën (borax en boorzuur) van de cellulosevezelisolatie stagneerden niet. De chemicaliën herkristalliseerden op het staaloppervlak, wat een sterkere randcorrosie veroorzaakte bij de testmonsters geïsoleerd met cellulosevezelisolatie in vergelijking met andere monsters.

50%, 23 C		50%, 23 C
85%, 23 C		85%, 23 C
<50%, 20 C		100%, 40 C

Figuur 11. Testklimaten bij corrosietests. Normale omstandigheden binnenshuis worden gebruikt als referentie (boven). Corrosietests worden uitgevoerd in vochtige lucht (midden) en in omstandigheden waar voortdurend condensatie optreedt (onder).



Figuur 12. Langdurige corrosietest met stalen balken in contact met andere materialen. Testomstandigheden +23°C en 85% relatieve vochtigheid. Testtijd 35 000 uur.

3.3 Hygrothermische simulaties

De nattigheidstijden werden ook berekend voor twee wandtypes die zijn afgebeeld in afbeelding 13 met behulp van het 2D-simulatieprogramma voor warmte-, lucht- en vochtoverdracht LATENITE /5, 13/:

- Geval A: de muur in afbeelding 6 links zonder buitenisolatie en
- Geval B: de muur getoond in Figuur 6 aan de rechterkant, zoals geval A behalve een extra laag buitenisolatie van 50 mm harde winddichte minerale wol.

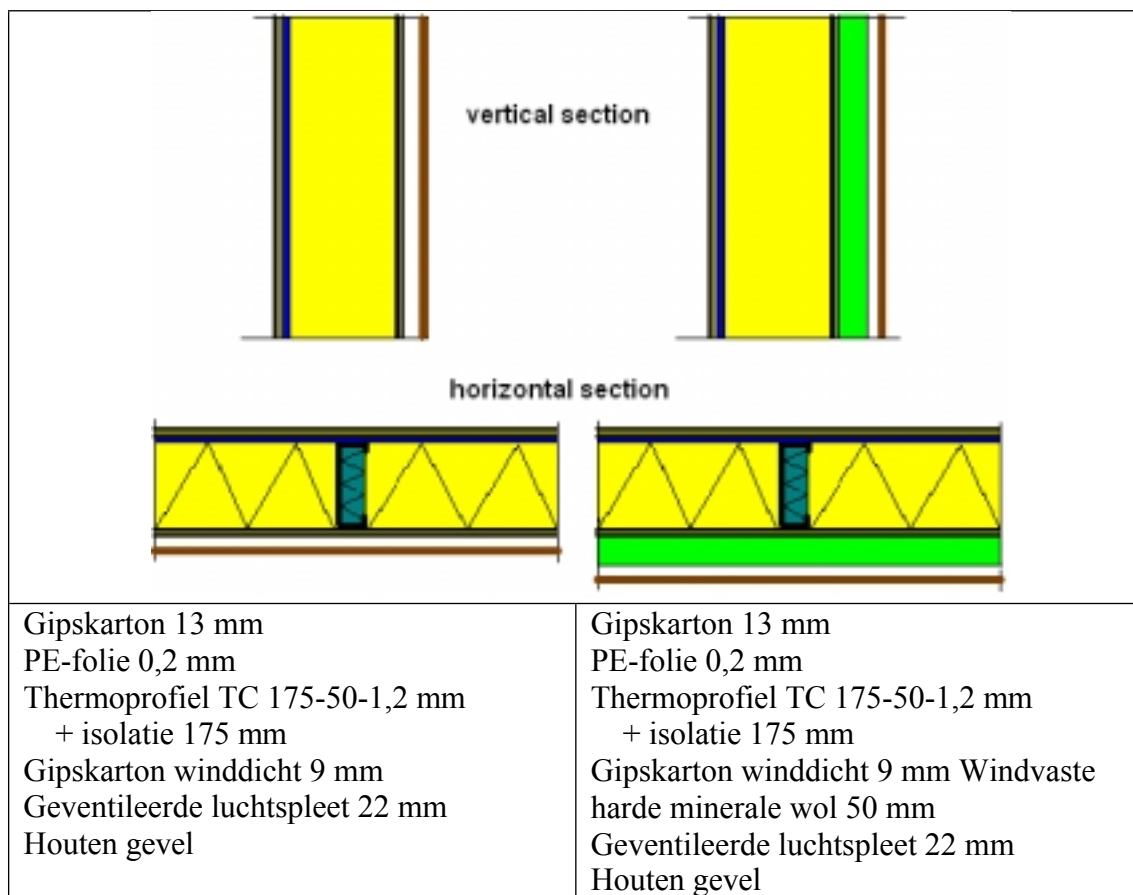
De uurklimaten van Helsinki, Finland en St. Hubert, België werden als uitgangspunt gebruikt. De oriëntatie van de muren was het noorden, wat beschouwd wordt als de slechtste oriëntatie in termen van hygrothermische prestaties vanwege de lage absorptie van zonnestraling. In de simulaties werd geen rekening gehouden met door de wind veroorzaakte regen en er werd aangenomen dat de muren een bekleding hadden met een goede spouwventilatie achter de bekleding. De begincondities van de materiaallagen waren +20°C en 50% relatieve vochtigheid. De binnenluchtcondities waren:

- temperatuur +22°C of buitenluchttemperatuur indien hoger dan +22°C
- vochtgehalte binnenlucht x_{in} was vochtgehalte buitenlucht $x_{out} + 3$ g/kg, maar beperkt tot $30\% \leq \text{relatieve vochtigheid} \leq 80\%$.

De simulaties werden uitgevoerd voor een periode van twee jaar vanaf 1 september.

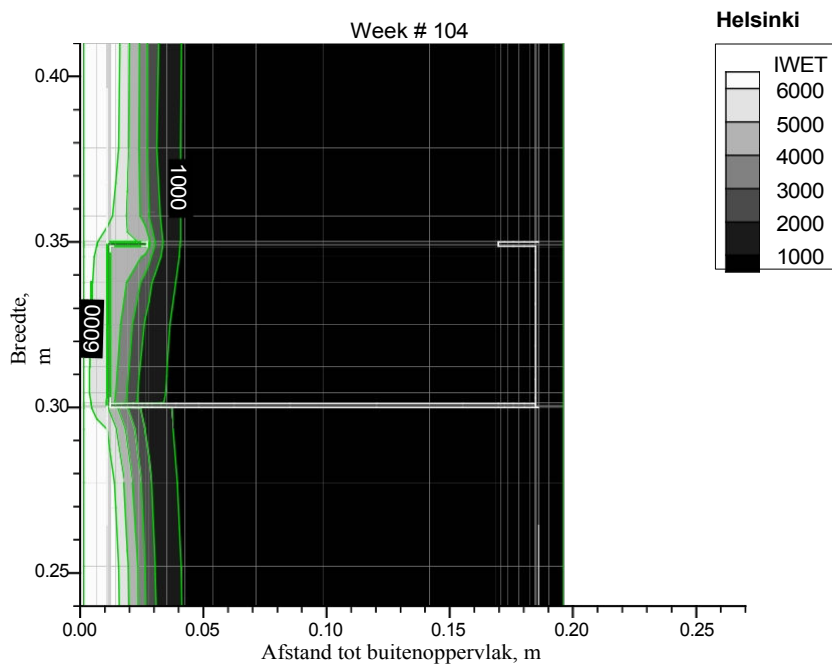
De geaccumuleerde tijd van natheid voor de periode van twee jaar in verschillende delen van de wandconstructies wordt getoond in Figuren 14 en 15 (wand zonder buitenisolatie) en in Figuren 16 en 17 (wand met buitenisolatie). De resultaten zijn geldig op voorwaarde dat

1) de damprem in de warme kant van de muur werkt zoals bedoeld, 2) er is geen hoog beginvochtgehalte in de muur en 3) het wandstelsel is ontworpen en gebouwd om vochtlekage in de muur te voorkomen (bijv. door wind veroorzaakte regen).

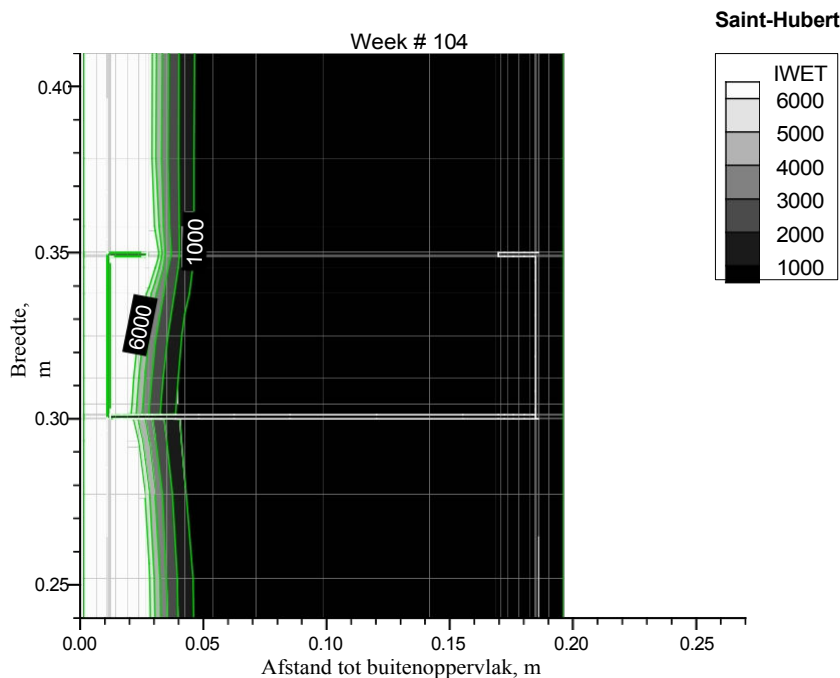


Afbeelding 13. Illustratie van de constructie met geperforeerd lichtmetalen frame zonder en met buitenisolatie.

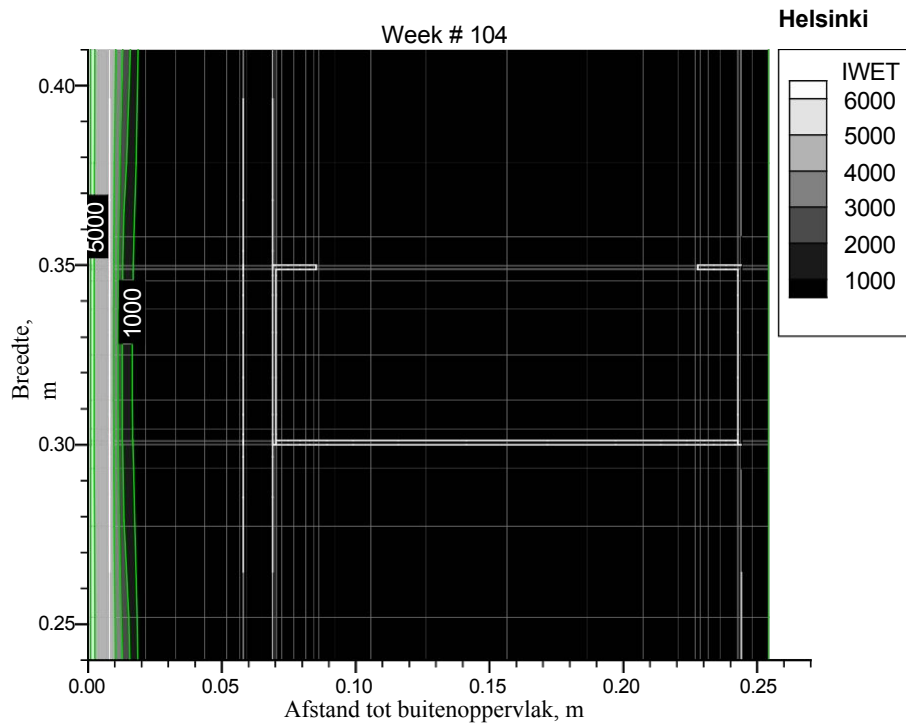
De resultaten tonen aan dat de duurzaamheid van de muren voornamelijk afhangt van het buitenklimaat en de hygrothermische eigenschappen van de windisolatie die aan de buitenkant van de profielen is aangebracht. De hygroscopiciteit van de gipsplaat is vrij laag, maar wanneer deze door de buitenlucht wordt bevochtigd, droogt deze vrij langzaam uit. Dit fenomeen verlengt de tijd dat de buitenflens van een profiel nat is.



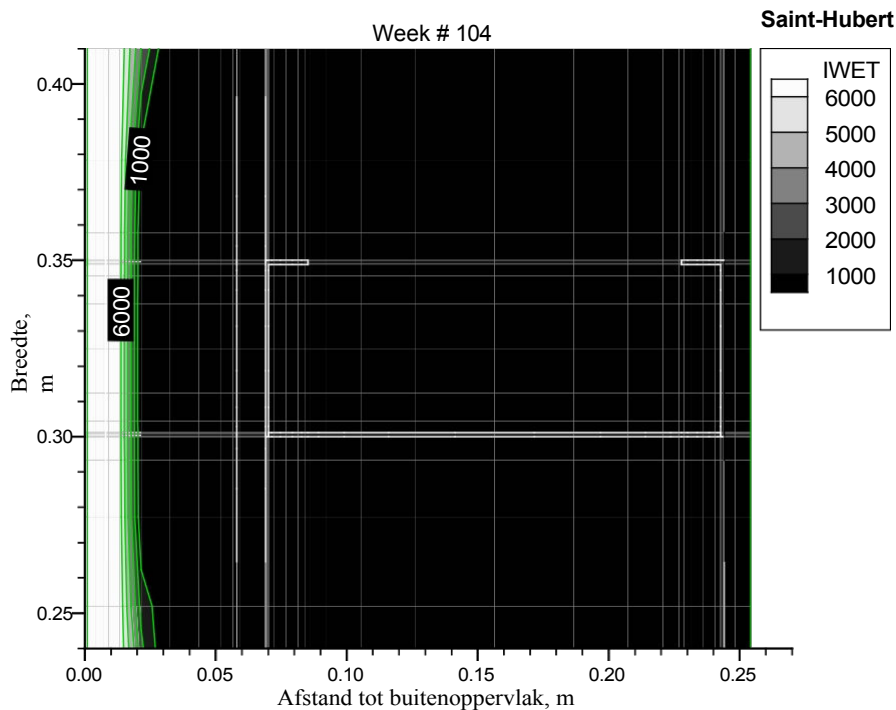
Afbeelding 14. Contourplot van de geaccumuleerde tijd van natheid in de lagen van de staalskeletwand zonder buitenisolatie. Buitencondities: Weergegevens Helsinki. De lengte van de gesimuleerde periode is 2 jaar (104 weken). Pijl toont de locatie van de hoogste contourwaarde /14/.



Afbeelding 15. Contourplot van de geaccumuleerde tijd van natheid in de lagen van de staalskeletwand zonder buitenisolatie. Buitencondities: Weergegevens van Saint Hubert. Lengte van de gesimuleerde periode is 2 jaar (104 weken) /14/.



Afbeelding 16. Contourplot van de geaccumuleerde tijd van natheid in de lagen van de staalskeletwand met 50 mm buitenisolatie. Buitencondities: Weergegevens Helsinki. De lengte van de gesimuleerde periode is 2 jaar (104 weken) /14/.



Afbeelding 17. Contourplot van de geaccumuleerde tijd van natheid in de lagen van de staalskeletwand met 50 mm buitenisolatie. Buitencondities: Weergegevens van Saint Hubert. Lengte van de gesimuleerde periode is 2 jaar (104 weken) /14/.

4. Samenvatting

Ongeacht het materiaal waarvan frameconstructies zijn gemaakt, vormen ze in meer of mindere mate koudebruggen over de thermische isolatielaag. Het warmtegeleidingsvermogen van staal is hoog. Een stalen frame in een lichte constructie dat ononderbroken doorloopt in de thermische isolatielaag heeft een aanzienlijk effect op de thermische prestatie van de constructie. De ontwikkeling van hulpmiddelen voor thermische beoordeling heeft bijgedragen aan de snelle ontwikkeling van goed geïsoleerde staalconstructies met enkelvoudig skelet, waarbij geperforeerde staalplaten als thermische onderbrekingen in de constructie worden aangebracht. Door de perforaties worden de thermische eigenschappen van de constructie verbeterd. De uitgevoerde analyse toont aan dat de nieuwe toepassing van geperforeerde lichtmetalen frames voldoet aan de gestelde eisen voor prestaties en duurzaamheid in het koude klimaat van Finland.

Als de constructies op de juiste manier worden ontworpen en gebouwd, zijn er geen grote vocht- of corrosierisico's aan verbonden. De langetermijnlaboratoriumtest en het veldonderzoek suggereren dat een stalen frame geïsoleerd met minerale wol een zeer goede corrosiebestendigheid heeft en dus een lange levensduur.

De prestaties van een geïsoleerde constructie hangen af van de prestaties van verschillende materiaallagen samen als een constructie. De verbinding van een winddichte gipsplaat met een stalen frame kan de corrosiebestendigheid van de zinklaag verminderen door de langzame vochtigheidsvariaties als gevolg van hygrothermische eigenschappen van gipsplaat met kartonnen oppervlakken. In vochtige omstandigheden vormen cellulosevezelisolatie en geïmpregneerd hout een alkalisch milieu, waardoor de zinkcorrosiesnelheid toeneemt. Een juist ontwerp en een juiste installatie kunnen deze risico's echter vermijden.

Volgens de berekeningsresultaten en veldmetingen bij Ylöjärvi stalen huizen hebben de eigenschappen van het winddichtingsmateriaal en de gevelconstructie een belangrijk effect op de algehele prestaties van de constructie. Door de thermische weerstand van het windisolerende materiaal te verhogen kan het duurzaamheidsrisico van corrosie door vochtbelasting aan de buiten- of binnenkant volledig worden genegeerd. Een waterdampdoorlatend en winddicht buitenisolatiesysteem verhoogt het droogpotentieel van een constructie.

De levensduur van de constructie kan worden geschat met behulp van de norm ISO 9223 Corrosie van metalen. De corrosie is afhankelijk van de natteduur. Met betrekking tot alle resultaten van verschillende onderzoeksprojecten ligt de tijd van natheid op het meest kritische punt van de constructie tussen 0 en 2600 in het klimaat van Helsinki en 0-6100 in het klimaat van St. De corrosieklasse van de zinklaag is C1 of C2 (ISO 9223), waarbij de levensduur van de zinklaag wordt geschat op 40 jaar tot meer dan 100 jaar.

In de klasse C1 is de lineaire corrosiesnelheid van zink minder dan 0,05 μm en in de klasse C2 minder dan 0,5 μm a

jaar. Als rekening wordt gehouden met de thermische en hygrothermische effecten van gevelbekledingen, kan een lager aantal natteduur worden verwacht en dus een langere levensduur voor de zinklagen.

Referenties

1. Blomberg, T. Warmtegeleiding in twee en drie dimensies. Computermodellering van bouwfysische toepassingen. Lund 1996. Universiteit van Lund. Rapport TVBH-1008.
2. DIN 52611. 1991. Deel 1. Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes von Bauteilen. Prüfung im Laboratorium. Duits instituut voor normering.
3. ISO 8990. Internationale norm 1994. Thermische isolatie. Bepaling van thermische transmissie-eigenschappen in stationaire toestand. Gekalibreerde en bewaakte warmhoudkast. Internationale Organisatie voor Standaardisatie.
4. ISO 9223. Internationale norm 1992. Corrosie van metalen en legeringen. Corrosiviteit van atmosferen. Classificatie. Internationale Organisatie voor Standaardisatie.
5. Karagioziz, A., Salonvaara, M. en Kumaran, K. 1994. LATENITE, Hygrothermische materialendatabase, IEA Annex 24. Internationaal Energie Agentschap IEA-rapport TI-CA- 94/04.
6. Leino, T., Häkkä-Rönnholm, E., Nieminen, J., Koukkari, H., Hieta, J., Vesikari, E. en Törnqvist, J. 1998. Teräsrakenteiden käyttöikäsuunnittelu. Ontwerp van de levensduur van staalconstructies. VTT Onderzoeksnotities 1937. 119 p. + app. 11 p. (In het Fins).
7. Energiezuinig stalen huis voor een koud klimaat. EGKS-project toepassing van staal in stedelijke habitats. Project n:o 7210-SA/902 - 95 - F6.1. Eindverslag. Rautaruukki Oy 1998.
8. Mao, G. 1997. Koudebruggen. Efficiënte modellen voor energieleanalyse in gebouwen. Proefschrift. Afdeling Bouwtechnologie, Departement Bouwwetenschappen, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm. Bulletin nr. 173. ISSN 0346-5918.
9. Nieminen, J. 1997. Nieuwe goed geïsoleerde lichtwandige staalskeletbouwconstructie. Proceedings of the 5th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques. Vilnius, Litouwen, 24-26 mei 1997. Technische universiteit Vilnius Geminida.
10. Nieminen, J., Kouhia I., Johanneson, G. en Mao, G. 1995. Ontwerp en thermische prestaties van geïsoleerde plaatconstructies. Proceedings of the Nordic Steel Construction Conference'95. Malmö, Zweden, 19-21 juni 1995.

11. Nieminen, J., Saari, M., Salmi, P. en Tattari, K. 1997. Stalen huis met laag energieverbruik voor een koud klimaat. Proceedings van de internationale conferentie Cold Climate HVAC'97. Reykjavik, IJsland, 1-2 mei 1997. IJslandse vereniging voor verwarming, ventilatie en sanitair ICEVAC.
12. Nieminen, J. en Salonvaara, M. 1999. Prestaties op lange termijn van lichte staalskeletbouw. Proceedings of the Fourth International Conference on Steel and Aluminium Structures ICSAS'99. Elsevier Science Ltd. ISBN 0-08- 043014-7.
13. Salonvaara, M. en Karagiozis, A. 1994. Vochttransport in gebouwschillen met behulp van een benaderende factorisatiemethode. In: Proceedings of the Second Annual Conference of the CFD Society of Canada Ed. by James J. Gottlieb and C. Ross Ethier. Toronto, 1-3 juni 1994.
14. Salonvaara, M. en Nieminen, J. 1998. Hygrothermische prestaties van een nieuw lichtmetalen enveloppensysteem met stalen frame. Journal of Thermal Environment and Building Science (22) 1998.
15. Teräsrunkoisen julkisivuelementin suunnitteluohje. 1993. Teräsrakenneyhdistys r.y. TRY. ISBN 952-9683-04-9
16. Onderzoeksprogramma VTT Staal. VTT Bouwtechnologie. Gedrukt.

Auteur(s) Nieminen, Jyri & Salonvaara, Mikael			
Titel Hygrothermische prestaties van lichte staalskeletwanden			
Abstract De hygrothermische prestaties van een nieuw lichtmetalen gebouwschilsysteem met stalen frame zijn geanalyseerd met behulp van 3-D thermische simulaties, 2-D gecombineerde warmte-, lucht- en vochtoverdrachtsimulaties, laboratoriumtests in een gekalibreerde en bewaakte warmhoudkast (ISO 8990), weerbestendigheidstests voor constructies op ware grootte, corrosietests en veldmetingen in experimentele gebouwen in Ylöjärvi, Centraal-Finland. De resultaten tonen aan dat een moderne stalen wandconstructie op basis van geperforeerde stalen profielen bevredigend presteert in het koude klimaat van Finland. De perforaties verminderen het warmteverlies langs het profiel aanzienlijk. De veldmetingen tonen aan dat er geen condensatie is opgetreden in het kozijnsysteem. Temperatuurmetingen en infraroodonderzoeken in demonstratiegebouwen tonen aan dat de oppervlaktetemperaturen hoog genoeg zijn om oppervlaktecondensatie of zelfs een verhoogde vochtigheid op het oppervlak te voorkomen. Volgens de berekeningen zijn er geen ernstige corrosierisico's in de stalen frames in het Finse klimaat. Het klimaat heeft echter een belangrijk effect op de prestaties en bij het ontwerp van de constructies moet rekening worden gehouden met de klimatologische omstandigheden.			
Trefwoorden bouwschil, staalconstructies, lichtmetaal, corrosietests, weerbestendigheid, vocht, oppervlaktecondensatie, klimaatomstandigheden, warmteoverdracht			
Activiteit VTT Bouwtechnologie, Bouwfysica, Bouwdiensten en Brandtechnologie, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-5772-7 (gebonden uitgave) 951-38-5773-5 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)			Projectnummer R8SU00655
Datum December 2000	Taal Engels	Pagina's 26 p.	Prijs A
Naam project VTT Staalonderzoeksprogramma		In opdracht van Rautaruukki Oyj, Outokumpu Polarit Oy, De Finse vereniging voor bouwstaal, het nationale technologieagentschap (Tekes), VTT Staalonderzoeksprogramma, De Europese Gemeenschap voor Kolen en Staal (EGKS)	
Titel van de serie en ISSN VTT Tiedotteita - Meddelanden - Onderzoeksnotities 1235-0605 (gebonden uitgave) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Verkocht door VTT Informatiedienst Postbus 2000, FIN-02044 VTT, Finland Telefoon internationaal. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

VTT TIEDOTTEITA - MEDDELANDEN - ONDERZOEKSNOTITIES

VTT RAKENNUSTEKNIikka - VTT BYGGNADSTEKNIK - VTT BOUWTECHNOLOGIE

- 1979 Nieminen, Jyri & Kouhia, Ilpo. Hyvin eristetyin loivan katon toimivuus ja vaatimukset. 1999. 38 s. + liitt. 3 s.
- 1981 Hakkarainen, Tuula (red.) Rookgasanalyse met behulp van Fourier transform infrarood spectroscopie. Het SAFIR-project. 1999. 81 p.
- 1988 Lahdenperä, Pertti. Ajatuksia ST-urakasta. Suomalaisen suunnittelu ja toteutus -menettelyn kehittäminen amerikkalaisten oppien pohjalta. 1999. 40 s. + liitt. 2 s.
- 1990 Keski-Rahkonen, Olavi & Björkman, Jouni. Palotilastoja Suomesta ja ulkomailta toiminnallisten palosäädösten perusteiksi. 1999. 56 s.
- 1991 Kokko, Erkki, Ojanen, Tuomo, Salonvaara, Mikael, Hukka, Antti & Viitanen, Hannu. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. 1999. 160 s.
- 1994 Leppänen, Pekka, Pulakka, Sakari, Saari, Mikko & Viitanen, Hannu. Levenscycluskosten geoptimaliseerd houten flatgebouw met meerdere verdiepingen. Nordic Wood, Fase 2, Project P-2. Eindrapport. 1999. 73 p.
- 1997 Jokinen, Petri, Lahtinen, Reima & Lehmus, Eila. Teräsrakenteiden suojaus kaariruiskutetulla sinkki-pinnoitteella. 1999. 50 s. + liitt. 14 s.
- 2001 Haakana, Maarit & Soitinaho, Ulla. Kiinteistöhoitohenkilöstön motivointi energiansäästöön. Kokemukset koulukohteista. 1999. 43 s. + liitt. 14 s.
- 2002 Andstén, Tauno, Juutilainen, Hemmo, Vaari, Jukka & Weckman, Henry. Testmethode voor activering en veiligheid apparaten van draagbare brandblussers. Nordtest Project No. 1435-99. 1999. 40 p. + app. 25 p.
- 2003 Vainio, Terttu, Riihimäki, Markku & Mäkelä, Pekka. Rakennuskustannusindeksi 2000. 1999. 70 s. + liitt. 2 s.
- 2005 Baroudi, Djébar, Kokkala, Matti & Weckman, Henry. Savuilmaisimien toiminta-aikojen laskentaohjelma PALDET 2.1S. 1999. 37 s. + liitt. 1 s.
- 2013 Tillander, Kati & Keski-Rahkonen, Olavi. Palokunnan saatavuuden merkitys rakennuksen paloriskitarkastelussa. 2000. 213 s. + liitt. 55 s.
- 2025 Riihimäki, Markku & Lehtinen, Erkki. Talopakettien asuinrakentamisessa. Valmisosien yleisyys toimituksissa. 2000. 44 p.
- 2027 Hietaniemi, Jukka, Hostikka, Simo, Lindberg, Liisa & Kokkala, Matti. Vyöhykemalliohjelman CFAST-kelpoisuuden arviointi. 2000. 51 s. + liitt. 14 s.
- 2028 Kokkala, Matti. Rakennusten paloturvallisuussuunnittelu. Toiminnallinen lähestymistapa. 2000. 63 s. + liitt. 15 s.
- 2029 Helenius, Antti. Schuifsterkte van clinchverbindingen in lichtmetaal. 2000. 40 p. + app. 13 p.
- 2030 Rantamäki, Jouko, Kääriäinen, Hannu, Tulla, Kauko, Viitanen, Hannu, Kalliokoski, Pentti, Keskikuru, Timo, Kokkoti Helmi & Pasanen, Anna-Liisa. Rakennusten ja rakennusmateriaalien homeet. 2000. 40 s. + liitt. 6 s.
- 2041 Virola, Heli & Raivio, Paula. Portlandsementin hydrataatio. 2000. 61 s.
- 2047 Leivo, Markku. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. Osa 2. Laadunvalvonta ja -varmistus. 2000. 13 s. + liitt. 25 s.
- 2048 Kuosa, Hannele. Älykkäät betonit ja betonirakenteet. 2000. 35 s. + liitt. 9 s.
- 2049 Lehtinen, Jari. Rakennushankkeen turvallisuusjohtaminen. Korkea rakennuskohde. 2000. 77 s. + liitt. 16 s.
- 2051 Karhu, Vesa & Loikkanen, Kaisu. Japanse en Chinese softwaremarkten voor bouw en faciliteitenbeheer. Voorlopige studie. 2000. 58 p. + app. 4 p.
- 2053 Luoma, Marianna & Pasanen, Pertti. Ilmanvaihtojärjestelmien puhdistus 15 toimistorakennuksessa. Puhdistuksen ja säädön vaikutus toimistotilojen kanavien puhtauteen, ilmanvaihtuvuuteen, tuloilman laatuun ja työntekijöiden työoloihin. 2000. 43 s. + liitt. 6 s.
- 2054 Riihimäki, Markku & Lehtinen, Erkki. Luonnonkiviteollisuuden markkinat. 2000. 57 s. + liitt. 19 s.
- 2056 Kuosa, Hannele & Vesikari Erkki. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. Osa 1. Perusteet ja käyttöikämitoitus. 2000. 141 s.
- 2070 Nieminen, Jyri & Salonvaara, Mikael. Hygrothermische prestaties van lichte staalskeletwanden. 2000. 26 p.
- 2072 Paiho, Satu, Leskinen, Mia & Mustakallio, Panu. Automaatiojärjestelmän hyödyntäminen energiatietoisien käytön apuvälineenä. 2000. 63 s.