

Overzicht van recente ontwikkelingen

Multiphysics voor bouwfysica

Multiphysics¹ behelst simulaties gebaseerd op meerdere fysische modellen of meerdere simultane fysische fenomenen. Multiphysics kenmerkt zich door het oplossen van gekoppelde partiële differentiaalvergelijkingen (eng: PDEs) waarbij vaak gebruik wordt gemaakt van de zg. eindige elementen methode (eng: FEM). Het commercieel verkrijgbare multiphysics softwarepakket COMSOL is veelbelovend voor toepassingen op het gebied van de bouwfysica en dan in het bijzonder voor warmte- vocht- en luchttransport. Het doel van dit artikel is een overzicht geven van recente modelleerontwikkelingen in COMSOL, binnen de unit BPS, die betrekking hebben op de bouwfysica. Door de vele ontwikkelingen wordt ieder onderwerp slechts beperkt besproken.

- door *dr.ir.ing. A.W.M.J. van Schijndel**

De essentie van multiphysics is een simulatieomgeving waarbij gebruikers het effect van meerdere simultane fysische fenomenen op een ontwerp kunnen voorspellen. Mits goed geïmplementeerd, kan multiphysics software de totale softwarekosten significant reduceren door het vervangen van andere pakketten door één enkel simulatiegereedschap [1]. Het gebruik van multiphysics software hangt nauw samen met rekenkracht. Vooral de omvang en complexiteit van nieuwe toepassingen vergt een continue ontwikkeling van rekenkracht voor de nabije toekomst [2]. Er zijn diverse softwarepakketten op de markt die kunnen worden gebruikt voor multiphysics toepassingen [3-6]. Het artikel beperkt zich echter tot het pakket COMSOL [3] en de digitale modellenbibliotheek HAMLab [7]. In dit artikel wordt getracht om een overzicht te geven van recente ontwikkelingen in relatie met COMSOL. Er is voor gekozen om de breedte van de nieuwe toepassingen te laten zien. Het gevolg is dat ieder

onderwerp slechts summier aan bod komt. Via de referenties kan men eenvoudig meer informatie verkrijgen over het desbetreffende onderwerp.

COMSOL – De mogelijkheden van dit pakket zijn eenvoudig in te zien via de ‘Model Gallery’ van de website [3]. Om een idee te krijgen is in onderstaande figuur een voorbeeld opgenomen van deze website.

HAMLab – HAMLab [7] staat voor: Heat, Air and Moisture Laboratory. In deze digitale bibliotheek zijn een aantal modellen onderbracht, ontwikkeld bij de Building Physics and Systems (BPS) unit van de faculteit Bouwkunde (TU/e), inclusief COMSOL-modellen. Het bijbehorend onderzoek is beschreven in [8]. De toepassingen voor het (MSc) onderwijs zijn beschreven in [9]. Na deze cursus, met een omvang van 2 ECTS (totaal 56 uur), zijn studenten in staat om complexe dynamische warmte- en vochttransportberekeningen uit te voeren m.b.v. COMSOL (Classkit). Dit arti-



Dr.ir.ing. A.W.M.J. van Schijndel

kel gaat hoofdzakelijk in op ontwikkelingen volgend op [8] en [9].

STATUS VAN MULTIPHYSICS SIMULATIE ONDERZOEK BIJ BPS

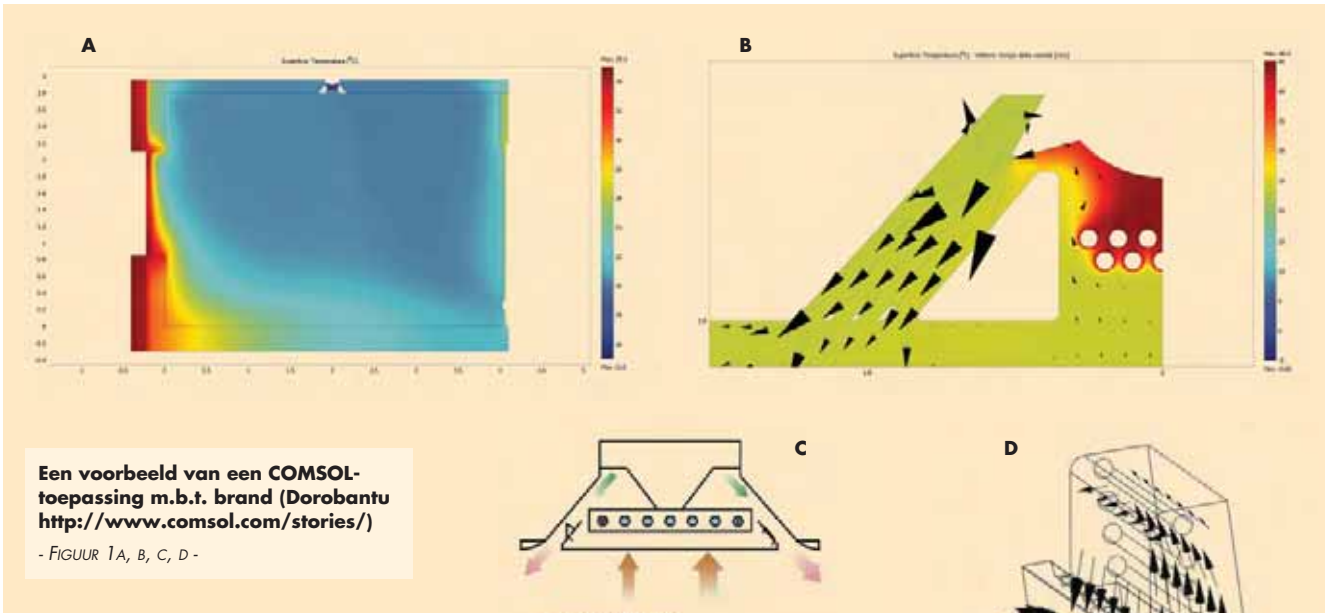
Warmte

Dit onderdeel is vrijwel uitontwikkeld. D.w.z. dat de meeste activiteiten op onderzoeksgebied zijn afgerond en verschoven naar ontwerpvragestukken. Via een cursus [9] zijn studenten in staat om 3D dynamische simulaties uit te voeren van bouwkundige constructies. In figuur 2 is een resultaat van deze cursus gegeven.

Lucht

Dit onderdeel is nog volop in ontwikkeling en zal misschien wel nooit ‘af’ komen gezien de turbulente aard van stroming. De nieuwe ontwikkelingen richten zich vooral op lucht in combinatie met warmte en vocht. In [8] is een recent overzicht gegeven wat betreft onderzoek. Een (voorbeeld)resultaat is weergegeven in figuur 3.

* Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde



Een voorbeeld van een COMSOL-toepassing m.b.t. brand (Dorobantu <http://www.comsol.com/stories/>)
- FIGUUR 1A, B, C, D -

Vocht

De belangrijkste ontwikkeling op vochtgebied betreft het modelleren van water- en damptransport met de zg. LpC (logaritmische capillaire druk) als vochtpotentiala. Het voordeel hiervan is dat stabiele simulaties worden verkregen van vochttransport in samengestelde constructies waarbij ook het effect van regen kan worden meegenomen. Daarnaast zijn er hulpmiddelen ontwikkeld om vochtafhankelijke materiaalgegevens (diffusiecoëfficiënt, hygroscopische kromme en dampdiffusie-weerstand) te vertalen in de LpC. In de onderstaande paragraaf wordt hier verder op ingegaan.

vochttransport te simuleren. Verificatie is mogelijk via o.a. de benchmarks van het HAMStad-project [10]. Als voorbeeld wordt Benchmark no. 1: 'Insulated roof' genomen. Deze benchmark is bovendien erg interessant omdat de methodologie kan worden gebruikt voor de verbetering van de bestaande Glaser-methode. De volledige rapportages en modellen zijn te downloaden van [7]. We volstaan in dit artikel met een samenvatting van de belangrijkste resultaten:

Warmte en Vocht

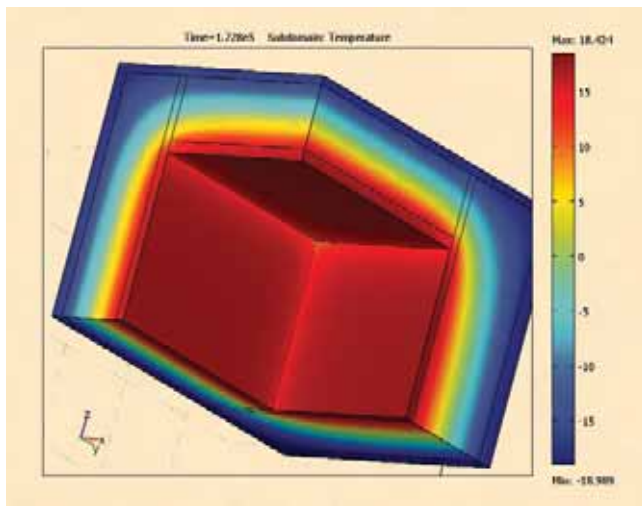
Internationale benchmark

Met de in de vorige paragraaf omschreven ontwikkeling is het mogelijk om gecombineerd warmte- en

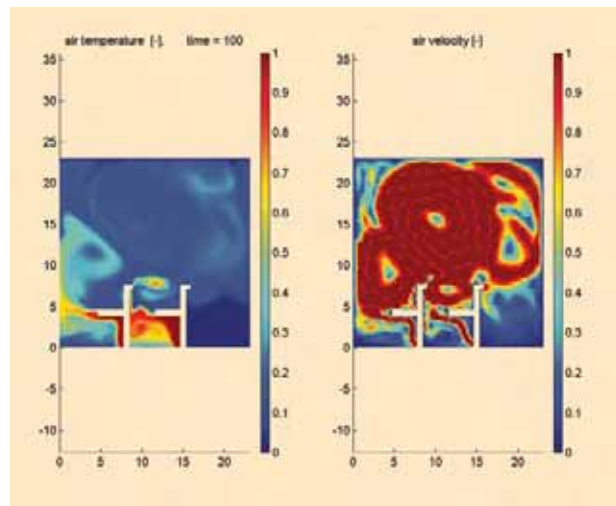
De 2D-weergave van de PDE-coëfficiënten berekend uit de materiaaleigenschappen (figuur 4, onder) is nieuw. Verder is gebleken dat de COMSOL-resultaten goed overeen-

komen met de andere modellen. Hiermee is een potentieel model voorhanden waarmee ook 3D-warmte- en vochtberekeningen kunnen worden gemaakt, inclusief regenval tegen de buitengevel. Er zijn op dit moment weinig andere modellen waarmee dit ook kan.

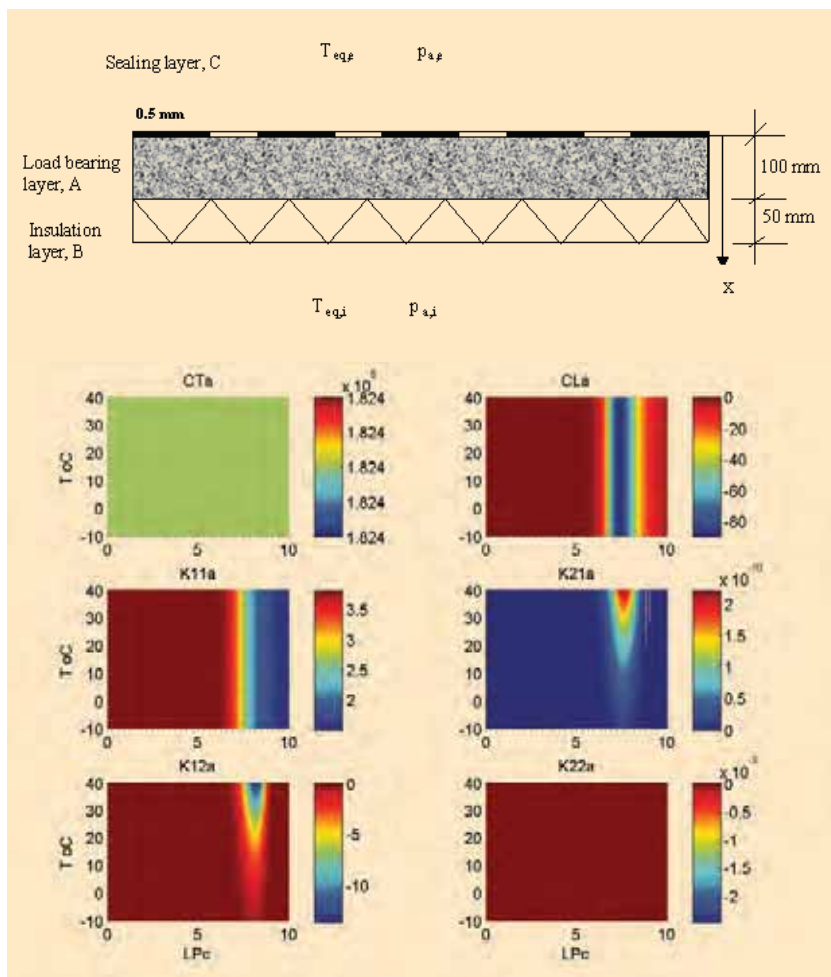
Toepassing monumentaal metselwerk
Het betreft een onderzoek naar de



Simulatie van de temperatuurverdeling van een hoek als onderdeel van een cursus [9].
- FIGUUR 2 -



Simulatie van de temperatuurverdeling (links) en snelheid (rechts) rondom een kerkbankverwarming.
- FIGUUR 3 -

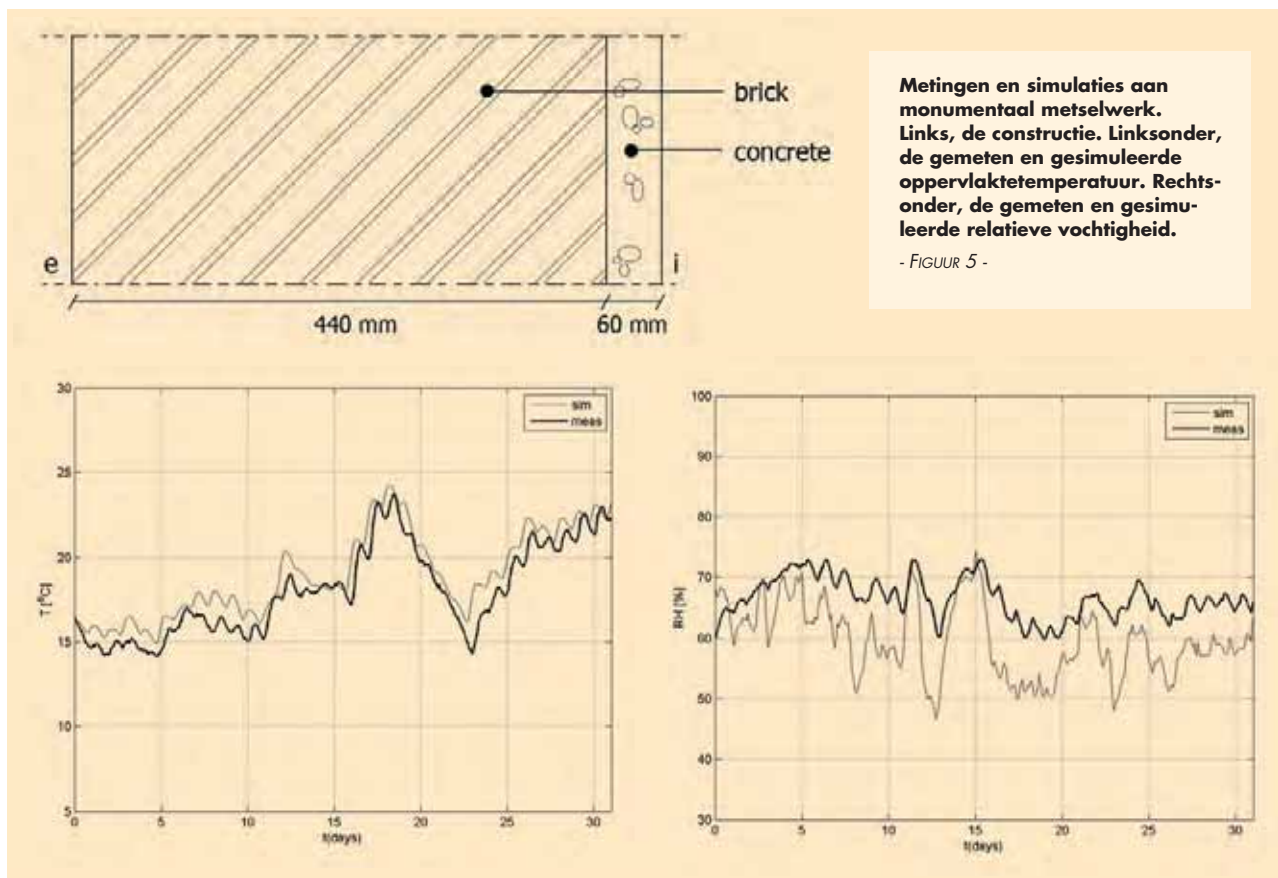


Boven: De geometrie; Onder: De materiaal-gegevens (CT,CL,Kij) als functie van de temperatuur (T) en vochtpotentiala(LPc).

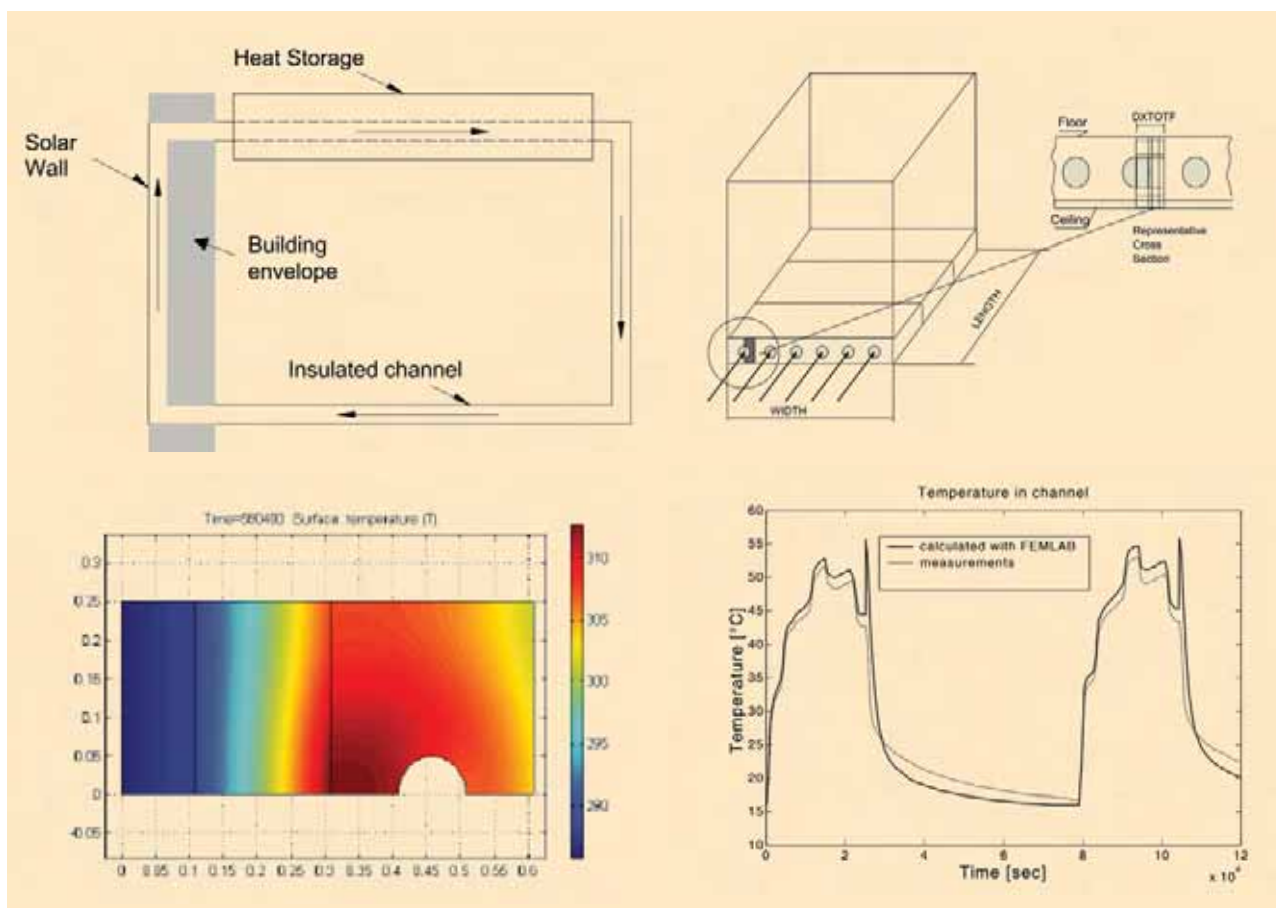
- FIGUUR 4 -

oorzaken van de vochtschade aan de toren van het Jachthuis St. Hubertus. [15]. Het primaire doel van dit onderzoek was om de oorzaken van de vochtproblemen in de toren van het Jachthuis eenduidig in kaart te brengen en om mogelijke oplossingen aan te dragen voor herstel van de schade en ter voorkoming van verdere schade. Daarnaast is een aantal metingen verricht om de weg die het vocht aflegt door de constructie inzichtelijk te maken. Uit de verrichte metingen van het vochtgehalte in de constructie volgt geen directe relatie tussen het optreden van slagregen en verhoogde vochtigheden aan het binnenoppervlak. In de meetperiode (mei tot november 2007) lijkt het vochtfront het binnenoppervlak van de gevels niet te bereiken. Ter ondersteuning van deze waarneming zijn de binnenoppervlaktecondities gesimuleerd met een warmte- en vochtmodel. In figuur 5 is een samenvatting gegeven.

De bovenstaande resultaten zijn verkregen met materiaaleigenschappen gebaseerd op literatuurbronnen. Het was niet toegestaan om de echte stenen te gebruiken. De temperatuur lijkt goed genoeg maar de relatieve vochtigheid kan nog wat worden ver-



- FIGUUR 5 -



Linksboven, het prinseschema van een gebouwgeïntegreerd thermisch opslagsysteem. Rechtsboven, een detail. Linksonder, simulatie van de temperatuurverdeling in de vloer m.b.v. COMSOL. Rechtsonder, de gemeten en gesimuleerde luchttemperatuur in het luchtkanaal [12].

- FIGUUR 6 -

beterd. Hiervoor moeten de vochteigenschappen van de materialen beter zijn. Dit laatste is in de praktijk vaak het struikelblok en zeker bij monumenten. Het effect van deze onzekerheid in o.a. de materiaaleigenschappen wordt momenteel onderzocht. De resultaten van deze gevoeligheidsstudie worden gepubliceerd in [16]. Het achterhalen van materiaaleigenschappen op deze manier ('inverse modeling') is een nieuwe ontwikkeling en heeft in het algemeen potentie bij voor het bepalen van materiaaleigenschappen. M.b.v. de simulatieresultaten is aangetoond dat op langere termijn (jaren) het vochtfront, het binnenoppervlak van de gevels niet bereikt en dus niet verantwoordelijk lijkt te zijn voor de vochtschade aan de binnenzijde. Op dit moment worden de hier beschreven ontwikkelingen op vochtgebied toegankelijk gemaakt voor studenten door dit onderwerp mee te nemen in een cursus [9]. Het doel is dat studenten in de nabije toekomst ook ontwerpvragestukken (3D) op vochtgebied (inclusief regen en damptransport) kunnen oplossen.

Warmte en Lucht Betonkernactivering

Een recente externe ontwikkeling op dit gebied is de modellering van in een gebouw geïntegreerde thermische opslagsystemen zoals betonkernactivering en wand- of vloerverwarming. De volgende toepassing is van [12]. Het doel van dit werk is het ontwikkelen van eenvoudige richtlijnen voor het ontwerpen van in het gebouw geïntegreerde thermische opslagsystemen. Figuur 6 geeft een samenvatting van de resultaten.

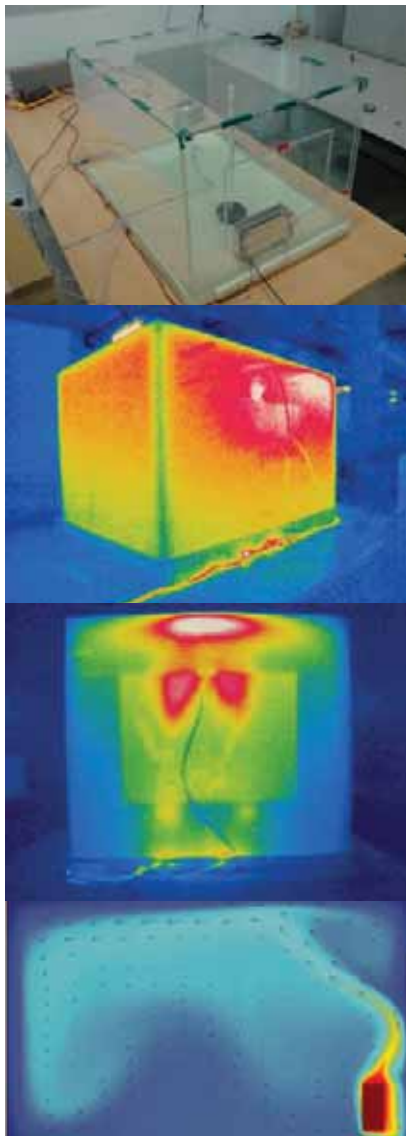
De conclusie van [12] is dat COMSOL gedetailleerde informatie verschaft over welk deel van de vloer echt actief is als thermische opslag. Het nadeel is dat de simulatieduur te lang is voor het uitvoeren van jaarsimulaties en uitgebreide parameterstudies. Intern (binnen de unit Building Physics and Systems (BPS)) wordt ook onderzoek gedaan naar betonkernactivering waarbij gebruikt wordt gemaakt van bovenstaande resultaten. De methodologie is vergelijkbaar met bovenstaande, met als belangrijkste

verschil dat bij BPS de COMSOL-modellen zijn geïmplementeerd in SimuLink. Het voordeel hiervan is dat er naast een state-of-art gebouwmodel ook een modellen-bibliotheek voor regelaars aanwezig is [8].

Validatie studie met een schaalmodel

Een nieuw project binnen BPS is het toepassen van schaalmodellen voor de validatie van multiphysics modellen [13]. Het idee achter dit project is te onderzoeken hoe goed (3D) dynamisch warmte- en luchttransport te simuleren is in fysieke schaalmodellen, onder gecontroleerde omstandigheden in het laboratorium. Voornamelijk worden de beperkingen van de huidige multiphysics simulaties onderzocht. Het uitgangspunt is dat de beperkingen van computersimulaties die gelden voor schaalmodellen, ook van toepassing zullen zijn op de werkelijke schaal. In figuur 7 is een overzicht gegeven van dit project.

Een voorlopige conclusie is dat de combinatie van de grootte van het huidige schaalmodel (0.6 m x 0.4 m x



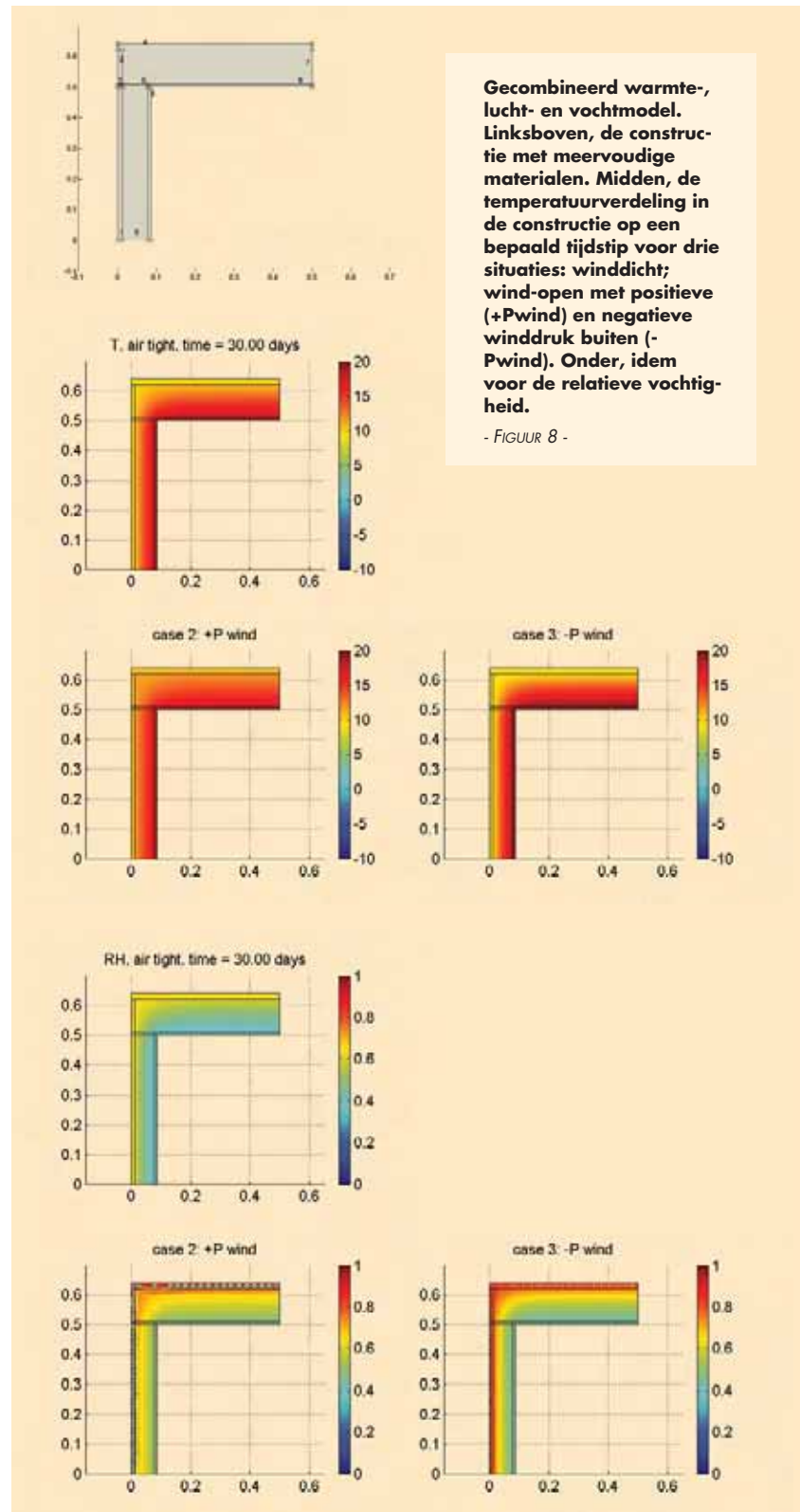
Het valideren van computersimulaties met schaalmodellen. Boven, het schaalmodel met sensoren en verwarmingsblok. Daar onder, infraroodopnamen die worden gebruikt als referentie voor de gesimuleerde oppervlaktetemperaturen. Een voorlopige 2D-simulatie van de temperaturen, zowel van de lucht als van de constructie (plexiglas).

- FIGUUR 7 -

0.4 m) en het complexe stromingspatroon bij aan/uit regelen nog te moeilijk is om 3D te simuleren in COMSOL.

Warmte, Lucht en Vocht

Met de opkomst van multiphysics software is het nu ook mogelijk om luchtstroming mee te nemen in de traditionele warmte- en vochttransportmodellen van constructies. In [14] is onderzocht wat de invloed is van luchtstroming (t.g.v. wind) door een constructie. Een samenvatting van dit werk is weergegeven in figuur 8. Hoewel de luchtstroming door de constructie erg klein is (orde 10^{-5} m/s), is



Gecombineerd warmte-, lucht- en vochtmodel. Linksboven, de constructie met meervoudige materialen. Midden, de temperatuurverdeling in de constructie op een bepaald tijdstip voor drie situaties: winddicht; wind-open met positieve (+Pwind) en negatieve winddruk buiten (-Pwind). Onder, idem voor de relatieve vochtigheid.

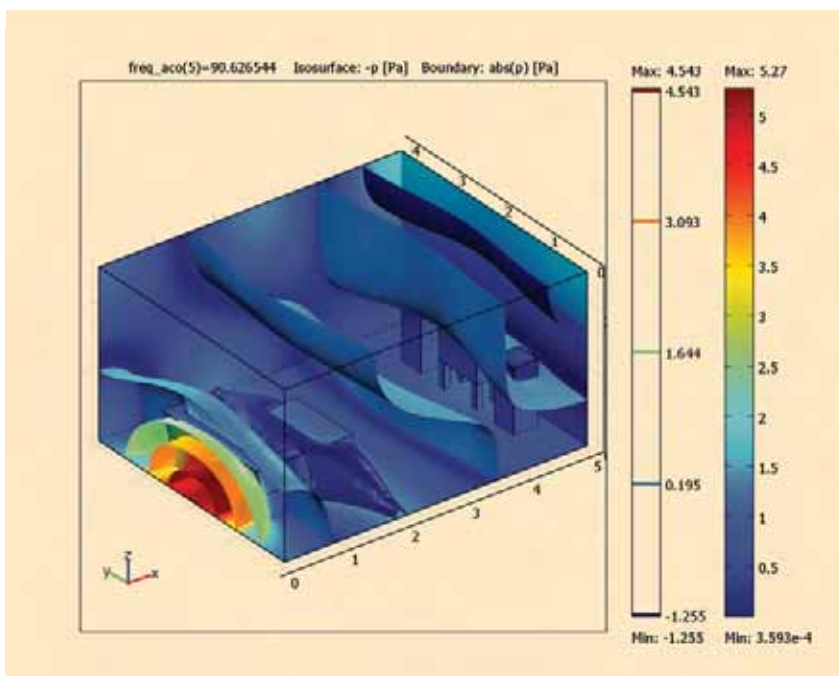
- FIGUUR 8 -

het effect op de relatieve vochtigheid substantieel (zie figuur 8, rechtsonder en vergelijk 'air tight' met '-P_{wind}'). Het betreft hier echter voorspellingen van een model. Bevestiging van deze resultaten via experimenteel onderzoek is gewenst.

Overig

Naast de in dit artikel vermelde ontwikkelingen op het gebied van warm-

te, lucht en vocht zijn er multiphysics modellen voor akoestiek, (mechanische) constructies (belangrijk voor thermische & hygrische spanningen) en hydrologie (belangrijk bij aquifers en bodemwarmtewisselaars). In figuur 9 is een akoestische toepassing weergegeven.



Drukverdeling in een ruimte.

- FIGUUR 9 -

CONCLUSIES

In dit artikel is een overzicht gegeven van recente ontwikkelingen op het gebied van multiphysics voor bouwfysica. Er kan worden geconcludeerd dat er volop beweging is in de ontwikkeling van multiphysics modellen die ook toepasbaar zijn voor bouwfysica.

AANBEVELINGEN

De auteur verwacht (net zoals bij Matlab toentertijd) in de nabije toekomst een sterke toename in het gebruik van multiphysics software (COMSOL) bij universiteiten, onderzoeksinstituten en bedrijven. Op dit moment ligt BPS nog ver voor, vergeleken met andere universiteiten, bij het toepassen van multiphysics COMSOL-modellen voor bouwfysica. Deze voorsprong is overdraagbaar aan bedrijven door bijvoorbeeld post academisch onderwijs en cursussen op dit gebied. Om de voorsprong te behouden is het echter noodzakelijk om nieuwe potentiële toepassingen vanuit de praktijk te onderzoeken en te implementeren. Een mogelijkheid om dit te realiseren zijn win-win projecten voor bedrijf en universiteit waarbij medewerkers van een bedrijf een substantieel onderzoek doen bij de universiteit en hun opgedane kennis en ervaring overdragen aan het bedrijf. 

REFERENTIES

1. Lethbridge P. 2005. *Multiphysics Analysis*. The industrial Physicist (dec 2004/jan 2005) pp 26-29. American Institute of Physics.
2. Graham S.L., Snir M., Patterson C.A. 2004. *Getting Up to Speed: The Future of Supercomputing*, The National Academies Press, Washington DC, ISBN 0-309-09502-6.
3. *COMSOL 2008*.
<http://www.comsol.com/>
4. *ANSYS 2008*.
<http://www.ansys.com/>
5. *LS-DYNA 2008*.
<http://www.ls-dyna.com/>
6. *FlexPDE 2008*.
<http://www.pdesolutions.com/>
7. *HAMLab 2008*.
<http://sts.bwk.tue.nl/hamlab/>
8. van Schijndel, A.W.M. 2007. *Integrated Heat Air and Moisture Modeling and Simulation*, Proefschrift Technische Universiteit Eindhoven, ISBN 978-90-6814-604-2, <http://alexandria.tue.nl/extra2/200612401.pdf>
9. van Schijndel, A.W.M. & Schellen, H.L. 2008. *Heat and Moisture in Building Envelopes – Numerical Exercises using COMSOL*. Handleiding, Technische Universiteit Eindhoven, <http://sts.bwk.tue.nl/7s533/>
10. Hagentoft, C-E. et al, 2002, *HAMSTAD WP2 Modelling, Version 4*. Report R-02:9. Gothenburg: Chalmers University of Technology. Hagentoft, C-E, Final report.
11. van Schijndel, A.W.M. & Brigggen, P.M. 2008. *The use of COMSOL for Building Constructions Engineering regarding Heat and Moisture Transport*. To be published at the Hannover COMSOL Conference 2008.
12. Jacobsen et al. 2005 *Design of Building Integrated heat Storage Systems*. Danish Technological Institute, Energy Vision.
13. van Goch, T.A.J. & van Schijndel, A.W.M. 2008. *The use of an experimental scale model for validating combined heat and air models*. To be published at the Hannover COMSOL Conference 2008.
14. van Schijndel, A.W.M. 2008. *The effect of micro air movement on the heat and moisture characteristics of building constructions*. Nordic Symposium on Building Physics, Copenhagen 16-18 Juni 2008, pp 1381-1388.
15. Brigggen, P.M. 2007. *Een onderzoek naar de oorzaken van de vochtschade aan de toren van het Jachthuis St. Hubertus*. MSc Scriptie TUE Bouwkunde, 120p.
16. van Schijndel, A.W.M. 2008. *The Exploration of an Inverse Problem Technique to Obtain Material Properties of a Building Construction*, To be published at 4TH International Building Physics Conference Istanbul 15-18 June 2009.

NOTEN

- ¹ Het Nederlandse equivalent woord bestaat (nog) niet.