

WARMTE-, LUCHT- EN VOCHTTRANSPORT IN BALKOPLEGGINGEN VAN MONUMENTALE GEBOUWEN

DE UITDAGING EN DE RISICO'S VAN NA-ISOLEREN

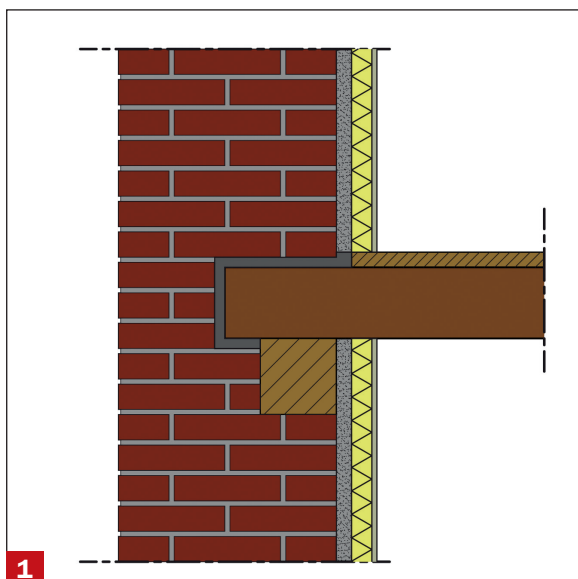
Duurzaamheid is de laatste jaren een belangrijk begrip geworden in de bouwsector. Het verminderen van het energiegebruik is hier een onderdeel van. In de nieuwbouw betekent dit dat de gebouwschil standaard wordt voorzien van isolatie om het energieverlies te beperken. De grootste gebouwoorraad in Nederland is echter de bestaande bouw en daar is nog veel winst te behalen. Zeker in gebouwen van voor 1950, aangezien deze gebouwen tijdens de bouw niet voorzien zijn van isolatie. Bij het (na)isoleren van deze gebouwen is de kans op vochtproblemen reëel, met name rondom aansluitingen van verschillende constructieonderdelen, zoals de oplegging van een houten balk in metselwerk.



ir. M. (Menno)
Spierenburg,
DPA Cauberg-Huygen,
Amsterdam

In het afstudeeronderzoek [1] is onderzocht hoe de aansluiting van een houten balk zich gedraagt en welke aanpassingen zorgen voor vermindering van de vochttoevluchten. Hierbij is het detail met de aansluiting van een houten balk in metselwerk (zie figuur 1) nagebootst middels simulatiesoftware (COMSOL multiphysics 5.0) dat in staat is om warmte-, lucht- en vochttransport in constructies te berekenen. Verschillende maatregelen en hun effectiviteit tegen vocht opbouw zijn bekeken.

In dit artikel wordt dieper ingegaan op het risico dat isoleren met zich meebrengt en wat de oorzaken hiervan zijn. Vervolgens wordt het toegepaste simulatiemodel en de nauwkeurigheid van het model toegelicht, waarna de resultaten worden beschreven. Tot slot zal in de conclusie worden besproken wat de resultaten betekenen en wat de waarde is van het onderzoek.



1 De oplegging van een houten balk in massief metselwerk. Voorzien van isolatie aan de binnenzijde

ISOLEREN NIET ZONDER RISICO

Inmiddels zijn er verschillende renovatieoplossingen om gebouwen energetisch te optimaliseren. Zo worden gebouwen voorzien van een nieuwe gebouwschil en wordt spouwmuurisolatie veelvuldig toegepast. Als het gaat om het isoleren van monumentale gebouwen wordt het lastiger. Meestal is er sprake van een beschermd gevelaanzicht en steensmuren. Een verandering aan de gebouwschil, zoals het toepassen van isolatie aan de buitenzijde of in de spouw, is geen optie. Isoleren aan de binnenzijde blijft dan als enige mogelijkheid over. In gebouwen met een houten vloerconstructie of houten kap, is isoleren aan de binnenzijde echter niet zonder risico. Lokaal, ter plaatse van de aansluiting van de constructie op de gevel, kan vochtaccumulatie plaatsvinden. Wanneer hoge vochtpercentages lang genoeg aanwezig zijn, leidt dat tot schimmelgroei en uiteindelijk houtrot [2]. In figuur 2 en figuur 3 is dit probleem goed zichtbaar, ter plaatse van de gevel is een balkkop gaan rotten.



2 Houten constructie als onderdeel van een inwendige constructie in een kerk in Beusichem



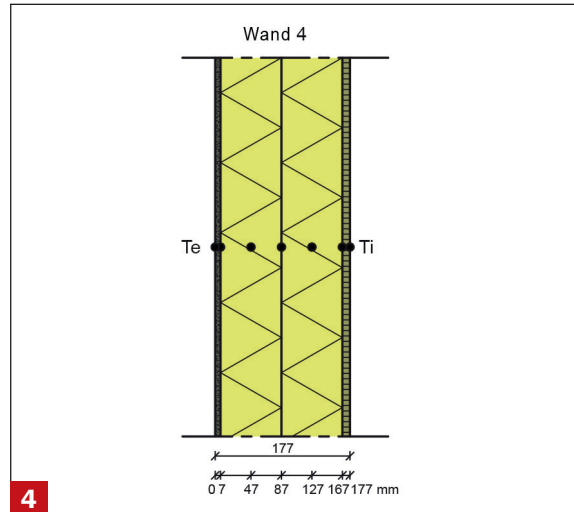
3 De houten balkkop is weggerot en sluit niet meer aan op het metselwerk

OORZAKEN VOCHTPROBLEMEN VOLGENS DE LITERATUUR

Ter plaatse van een balkkop kunnen vochtproblemen ontstaan als isolatie aan de binnenzijde wordt aangebracht. In een ongeïsoleerde situatie vindt verdamping plaats aan zowel de binnenzijde als de buitenzijde van de wand. Na het aanbrengen van isolatie aan de binnenzijde kan geen verdamping meer plaatsvinden doordat de wand is afgesloten van het binnenklimaat, zoals in figuur 1 zichtbaar is. De verdamping van het vocht is nu alleen nog mogelijk via de buitenzijde van de wand.

Vooraf in combinatie met een hoge regenbelasting op de gevel, in Nederland zijn dit vooral de zuidwestgevels, kan er vochtaccumulatie optreden [3]. Een hoge regenbelasting is echter geen voorwaarde voor vochtaccumulatie. Ook bij een lage regenbelasting kunnen er vochtproblemen ontstaan die veroorzaakt worden door convectie. Convectie kan al plaatsvinden door kleine kieren/openingen tussen de isolatie of door een slechte aansluiting van de isolatie op de muur of de houten balk. De warme vochtige lucht van het binnenklimaat dringt via de openingen door in de koude constructie, daar koelt de lucht af en zal condensatie plaatsvinden [4]. Een bekende oplossing om het vochtprobleem door convectie te verminderen is de toepassing van een dampremmende laag. Hiermee wordt voorkomen dat de vochtige lucht de constructie binnendringt. Belangrijk hierbij is dat de dampremmende laag volledig gesloten is. Een slechte aansluiting op muren en balken kunnen het effect van de dampremmende laag sterk verminderen [5].

Een oplossing om vochtaccumulatie in de constructie te verminderen, is de toepassing van actieve of passieve verwarming nabij de aansluiting van de balk op de wand. Enerzijds zorgen de hogere temperaturen voor een verlaging van de relatieve vochtigheid. Anderzijds zorgt de toegevoerde energie voor een betere verdamping van het vocht [6]. Ook is het bewust creëren van een koudebrug, door 200 mm rondom de balk vrij te houden van isolatie, een effectieve maatregel [7]. Toch blijft de effectiviteit van bovengenoemde maatregelen afhankelijk van vele factoren zoals het klimaat en de constructie, ze kunnen dus niet zonder meer worden toegepast. Om te bepalen of er vochtproblemen, schimmelgroei of houtrot, kunnen ontstaan, is het belangrijk om de eigenschappen van de materialen goed te kennen.



4

Het 1D detail dat is gebruikt voor de verificatie van het COMSOL model

Vocht kan op zichzelf geen schade veroorzaken aan hout. Hiervoor zijn schimmels nodig die hout als voedingsbodem gebruiken. Deze schadelijke schimmels kunnen alleen ontstaan wanneer er voldoende vocht is. Er zijn ook onschadelijke schimmels, deze komen meestal tot uiting aan het oppervlak. Hoewel de onschadelijke schimmels relatief onschuldig zijn, maken ze wel de weg vrij voor de schadelijke variant.

Bij de aansluiting van een houten balk op metselwerk zijn er twee punten die vermeden moeten worden, schimmelgroei nabij het oppervlak en houtrot (veroorzaakt door schadelijke schimmels). Beiden hebben hoge vochtigheidspercentages nodig om te kunnen ontstaan en te overleven. Vanuit de literatuur komen twee statische grenzen veelvuldig naar voren:

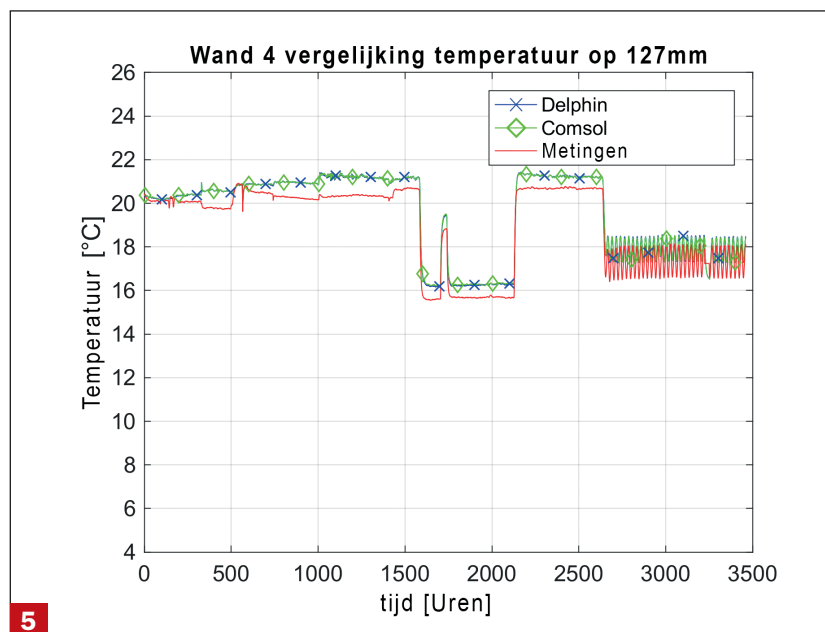
- Een relatieve vochtigheid van 80% nabij het materiaaloppervlak (hierboven is kans op schimmelgroei).
- Een vochtigheidspercentage van 20% binnen in het materiaal (hierboven is kans op houtrot).

Nu zijn deze grenzen arbitrair. Vochtpercentages kunnen lokaal sterk verschillen. Daarnaast zijn schimmelgroei en houtrot ook afhankelijk van de temperatuur en de tijdsduur waarin het vocht aanwezig is [8][9]. Er is een model ontwikkeld waarmee de kans op schimmelvorming nauwkeuriger berekend kan worden [10]. Echter, voor dit onderzoek zijn de statische grenzen voldoende om een indicatie te geven van de risico's op schimmelgroei en houtrot.

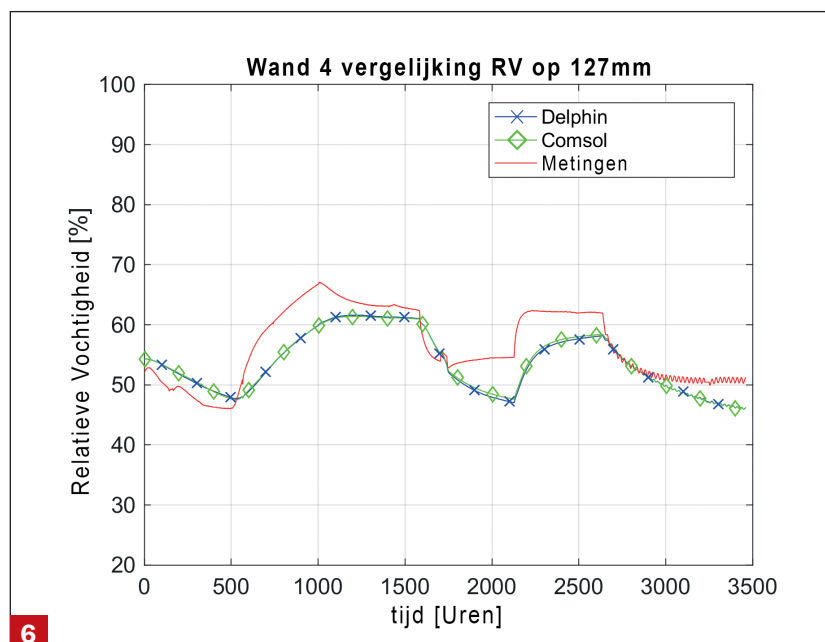
SIMULATIEMODEL EN DE NAUWKEURIGHEID

Voor de simulaties met COMSOL zijn de differentiaalvergelijkingen voor warmte-, lucht- en vochttransport handmatig in de software ingevoerd. De materialen en materiaaleigenschappen (zoals de sorptie, diffusie en vochtpermeabiliteit) zijn voorbereid met Matlab, zodat ze direct in de differentiaalvergelijking geïmplementeerd kunnen worden.

Om meer duidelijkheid te krijgen over de correctheid van het COMSOL model, is met behulp van andere software



5 Vergelijking van de temperatuur tussen het Delphin model (blauw) en COMSOL model (groen)



6 Vergelijking van de relatieve vochtigheid tussen het Delphin model (blauw) en COMSOL model (groen)

(Delphin 5.8) een verificatie uitgevoerd. Delphin is specifiek ontworpen om warmte- en vochttransport te simuleren en alle differentiaalvergelijkingen zijn al in de soft-

ware geïmplementeerd. Hierdoor hoeft alleen de constructie in de software opgebouwd te worden en dienen de klimaatcondities op de binnen- en buitenoppervlaktes geprojecteerd te worden. Voor de verificatie is een 1D constructie gesimuleerd zoals zichtbaar in figuur 4.

Voor zowel COMSOL als Delphin is gebruik gemaakt van dezelfde materiaaleigenschappen en dezelfde condities op de externe oppervlaktes. In figuur 5 en 6 zijn de resultaten van de verificatie zichtbaar. In beide figuren zijn meetresultaten uit een klimaatkamer bijgevoegd om te zien of de resultaten dezelfde orde grote hebben als de metingen. Het is duidelijk te zien dat zowel de resultaten van de temperatuur (figuur 5) als de resultaten van de relatieve vochtigheid (figuur 6) voor Delphin en COMSOL goed overeen komen. Dit sluit aan bij de bevindingen uit eerder onderzoek [11]. Het COMSOL model kan daarmee gebruikt worden voor de simulatie van de balk opgelegd in het metselwerk.

SIMULATIES EN RESULTATEN

In totaal zijn er 12 simulaties uitgevoerd van de aansluiting tussen houten balken en metselwerk, met als doel om de effecten van verschillende situaties en maatregelen in kaart te brengen. De simulaties kunnen worden onderverdeeld in 3 categorieën:

- binnenklimaat
- isolatie type
- constructie type

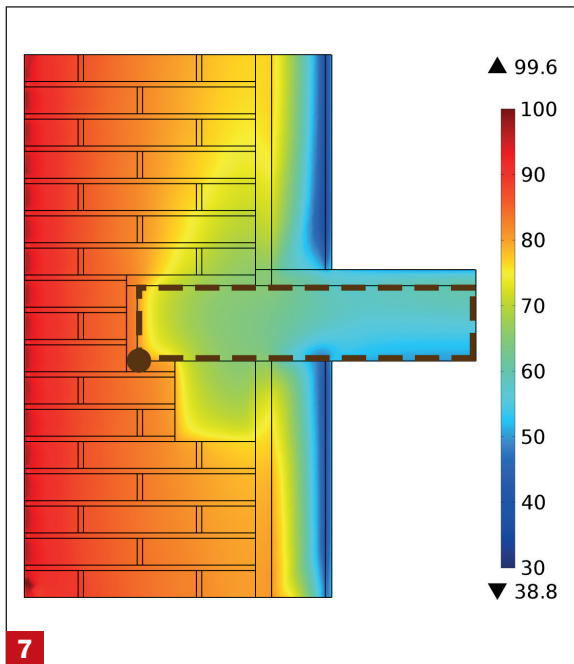
Voor de detaillering is gebruik gemaakt van een eerder onderzoek uit Denemarken. In dit onderzoek zijn metingen verricht in een meerlaags woongebouw met dezelfde constructie. Van deze constructie is vervolgens een Delphin simulatiemodel gemaakt [12].

Het 2D model van de Deense constructie is aangepast, zodat de maatvoering overeenkomt met die van een veelvoorkomende Nederlandse constructie. Eveneens zijn de klimaatgegevens van KNMI meetstation Schiphol uit het jaar 2012 toegepast voor de buitencondities. 2012 is één jaar voor de metingen in Denemarken en is volgens de KNMI een gemiddeld jaar die qua temperatuur slechts 0,2°C afwijkt van het langjarig gemiddelde. Het jaar bevat een zeer koude periode aan de start en een warme periode in de zomer. Met 876 mm is de hoeveelheid regen wel iets hoger dan het langjarig gemiddelde van 849 mm. De keuze voor het meetstation Schiphol is gebaseerd op de

Tabel 1: Materiaalgegevens gebruikt in de COMSOL simulaties

Materiaaleigenschappen	Eenheid	Metselwerk	Mortel	Pleisterwerk	Vuren (hout)	Gipsplaat	EPS	XPS	Calcium silicaat
Dichtheid (ρ)	[kg/m ³]	1788	1568	1800	528	850	23	35	270
Warmte capaciteit (c)	[J/kg·K]	868	1000	850	2000	850	1500	1500	1158
Conductiviteit (λ)	[W/m·K]	0,91	0,70	0,82	0,13	0,20	0,036	0,027	0,069
Dampwerendheid (μ)	[-]	13,2	30	12	40	10	96	225	3,85
Vochtdoorlatendheid	[kg/m·s·Pa]	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$6,5 \cdot 10^{-10}$	$2,8 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$6,3 \cdot 10^{-9}$	-	-	$2,34 \cdot 10^{-8}$
Luchtdoorlatendheid*	[kg/m·s·Pa]	$5 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$4,16 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	-	$1,38 \cdot 10^{-7}$

* Eigenschappen gebaseerd op meetgegevens van ASHREA RP1018



De distributie van relatieve vochtigheid binnenin een volledig geïsoleerde constructie. Met een museum binnenklimaat, gedurende een regenbui op 29-12-2012. De resultaten van figuur 8 en 9 zijn berekend voor het gebied binnen de rechthoek. De cirkel geeft de positie weer van de resultaten uit figuur 10

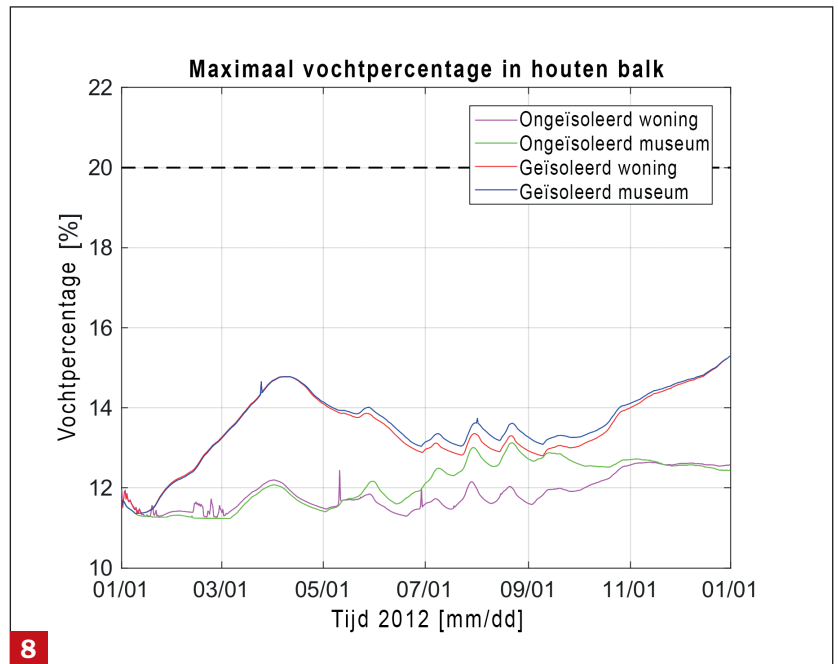
nabijheid van Amsterdam en Haarlem. In Nederland is daar volgens de Rijksdienst Cultureel Erfgoed (RCE) de concentratie van monumentale gebouwen het hoogst.

De constructie is op een tweetal punten beoordeeld. Ten eerste is de relatieve vochtigheid geanalyseerd op de hoeken van de balkkop en op de inwendige hoeken waar de connectie met het binnenklimaat plaatsvindt. Ten tweede is het maximaal optredende vochtgehalte in de houten balk berekend en geanalyseerd.

Binnenklimaat

De eerste categorie is het binnenklimaat. Voor deze categorie is met een binnenklimaat uit een woning (variërend klimaat zonder zomerkoeling, gesimuleerd middels HAM-BASE en daarmee afhankelijk van het klimaat, de constructie en de voorkeursinstellingen van het binnenklimaat) en een binnenklimaat uit een museum (stabiel klimaat met 20°C en RV van 50% gedurende het jaar) gesimuleerd om te zien wat het effect is van het binnenklimaat op het vochtgehalte in de constructie. De constructie is zowel in geïsoleerde als ongeïsoleerde staat gesimuleerd (zie figuur 7 voor de posities van de analyse).

In figuur 8 is het maximale vochtgehalte in de balk zichtbaar. Zoals verwacht is het vochtgehalte het hele jaar hoger voor de geïsoleerde constructie door verminderde verdamping aan de binnenzijde. Daarnaast is er ook een duidelijk verschil waarneembaar tussen het binnenklimaat van een woning en het binnenklimaat van een museum. In de zomer is een stabiel binnenklimaat zoals dat van een museum namelijk minder gunstig voor het vochtgehalte. In de winter stabiliseert het vochtgehalte en is er nagenoeg geen verschil meer tussen beide klimaten.



Hoogste vochtpercentage in de houten balk. De ongeïsoleerde situatie met een woning (blauw) en museum (rood) binnenklimaat is vergeleken met de geïsoleerde situatie met een woning (paars) en museum (groen) binnenklimaat

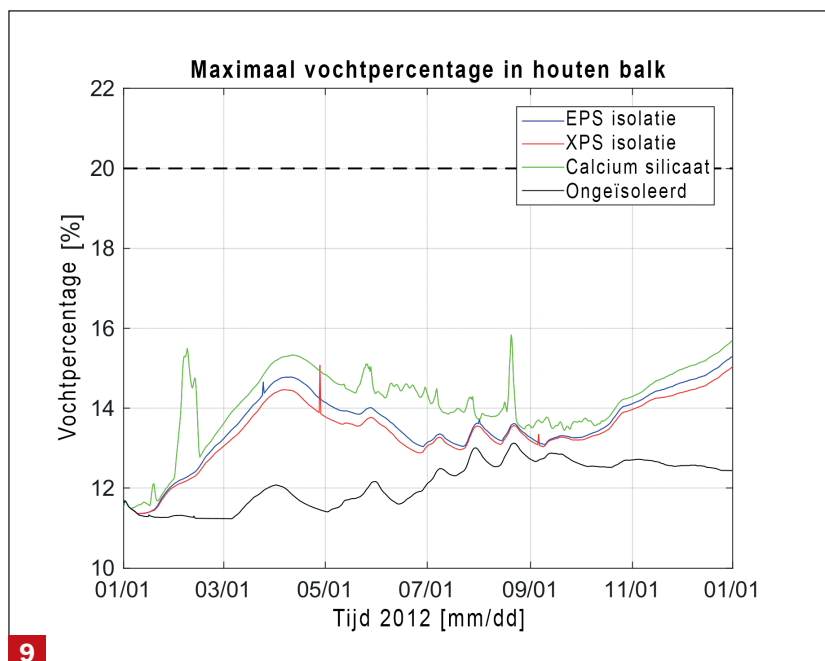
Om het aantal simulatievarianten te beperken, wordt het maatgevende binnenklimaat, dat van een museum, toegepast in de volgende simulaties.

Isolatie type

In de tweede categorie zijn drie verschillende isolatiematerialen toegepast om te zien welk effect ze hebben op de vochtgehalten in en nabij de constructie. De simulaties zijn uitgevoerd met EPS, XPS en Calcium silicaat.

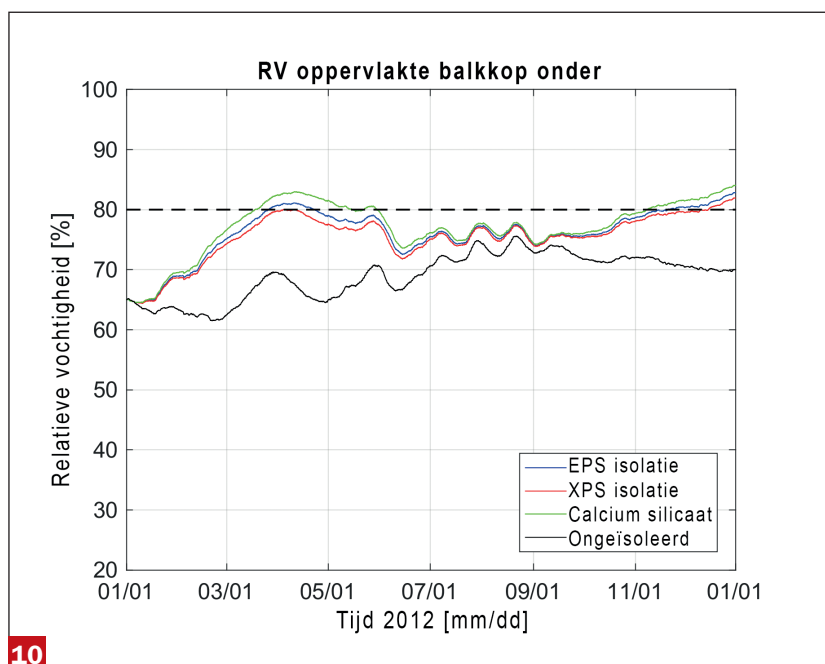
Voor zowel EPS als XPS is de vochtpermeabiliteit niet berekend, aangezien ze beide volledig vochtwerend zijn. Daarnaast is XPS ook volledig luchtdicht en is daardoor de luchttransport niet meegenomen. Calcium silicaat is het enige materiaal in deze vergelijking die actief is als het op vochtpermeabiliteit aankomt. De dampdoorlatendheid van dit materiaal is tevens het laagste (zie tabel 1 voor de materiaalgegevens). Ter vergelijking is ook een volledig ongeïsoleerde constructie meegenomen in de vergelijking.

Opvallend is dat de verschillen tussen de verschillende isolatiematerialen relatief klein zijn ten opzichte van de volledig ongeïsoleerde constructie. XPS resulteert in de laagste hoeveelheid vocht zowel voor de vochtgehalten in de balk (figuur 9) als de relatieve vochtigheid nabij het oppervlak (figuur 10). Calcium silicaat, het enige materiaal dat in staat is om vocht op te nemen en af te geven heeft het slechtste resultaat, maar zorgt wel voor een stabilisering van de relatieve vochtigheid nabij het oppervlak. De resultaten van EPS bevinden zich tussen beide materialen. Voor alle isolatiematerialen stijgt het relatieve vochtigheidspercentage bij de balkkop tot boven de 80%, wat een risico op schimmelvorming met zich meebrengt.



9

Hoogste vochtpercentage in de houten balk. De ongeïsoleerde constructie (zwart) is vergeleken met een volledig geïsoleerde constructie met EPS (blauw), XPS (rood) en calcium silicaat (groen)



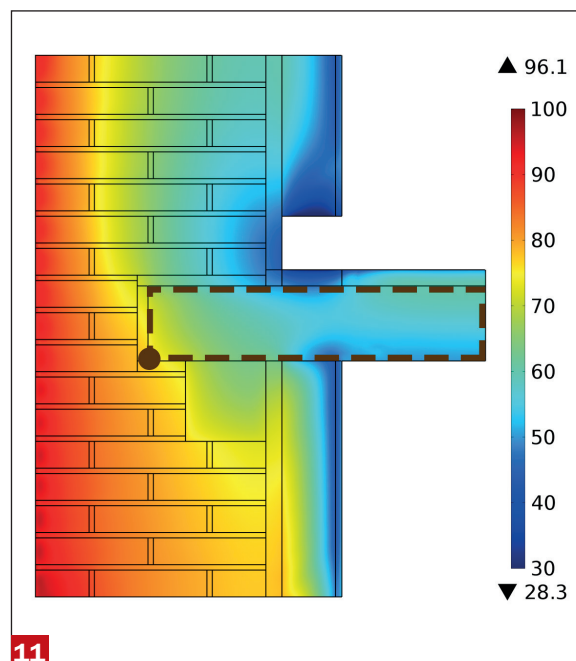
10

Relatieve vochtigheid nabij het oppervlak van de houten balkkop. De ongeïsoleerde constructie (zwart) vergeleken met een volledig geïsoleerde constructie met EPS (blauw), XPS (rood) en calcium silicaat (groen)

Constructie type

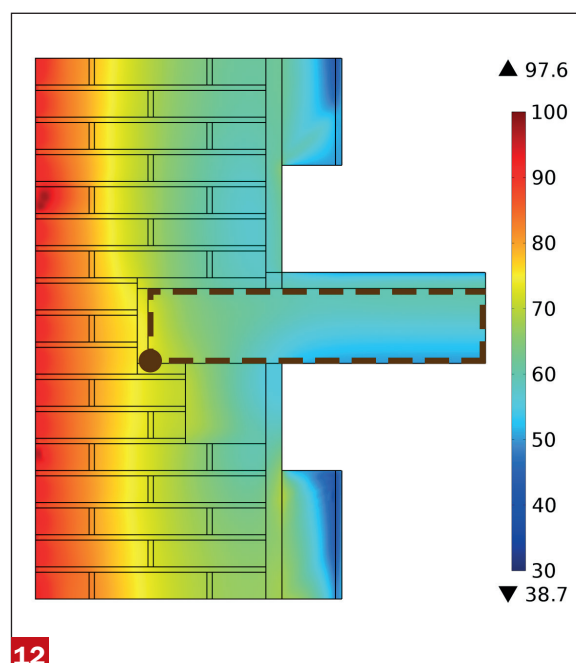
In de derde categorie is de constructie van het isolatiepakket gewijzigd en daar zijn twee varianten van gemaakt. Voor beide constructies is het isolatiemateriaal EPS toegepast. Voor de eerste variant is actieve verwarming aan de binnenzijde toegepast met een verwarmingsbuis die de lucht lokaal tot 30°C kan verwarmen (zie figuur 11) voor de tweede variant is de koudebrug bewust vergroot door 200 mm rondom de balk vrij te houden van isolatie, dit is een vorm van passieve verwarming (zie figuur 12).

In de vergelijking is een volledig geïsoleerde constructie meegenomen, evenals een volledig ongeïsoleerde con-



11

De distributie van relatieve vochtigheid binnen in een constructie voorzien van actieve verwarming in de opening, gedurende een regenbui op 29-12-2012. De resultaten van figuur 13 zijn berekend voor het gebied binnen de rechthoek. De cirkel geeft de positie weer van de resultaten uit figuur 14



12

De distributie van relatieve vochtigheid binnen in een constructie waarbij 200 mm rondom de balk is vrijgehouden van isolatie, gedurende een regenbui op 29-12-2012. De resultaten van figuur 13 zijn berekend voor het gebied binnen de rechthoek. De cirkel geeft de positie weer van de resultaten uit figuur 14

structie. In figuur 11 en 12 is duidelijk het effect te zien van de actieve en passieve verwarming. In het geval van actieve verwarming (figuur 11) is het vochtigheidspercentage lokaal sterk afgenomen ten opzichte van de volledig geïsoleerde situatie uit figuur 6. Echter, nabij de balkkop wordt het effect van de verwarming minder. Bij de passieve verwarming (figuur 12) is te zien dat het vochtigheidspercentage homogeen verdeeld is. Over het gehele detail is een verlaging zichtbaar.

Het positieve effect van beide maatregelen blijkt ook uit de resultaten van het maximale vochtpercentage (figuur 13) en de relatieve vochtigheid nabij de balkkop (figuur 14). De stijging van het maximale vochtpercentage door toepassing van isolatie wordt gehalveerd wanneer actieve verwarming is toegepast. 200 mm rondom de balk vrijhouden van isolatie heeft zelfs een groter effect waardoor nog maar een kwart van de stijging overblijft.

De relatieve vochtigheid nabij het oppervlak van de balkkop laat dezelfde effecten zien als bij het vochtpercentage het geval is. Voor zowel actieve als passieve verwarming blijft de relatieve vochtigheid onder de 80%.

LIMITATIES ONDERZOEK

De resultaten uit dit onderzoek hebben wel een aantal limitaties. De belangrijkste limitaties zijn:

- Het ontbreken van de zoninstraling op de buitengevel, inclusie van deze parameter gaf problemen met de solver in COMSOL.
- Het simuleren van slechts één jaar, waardoor onduidelijk is of er na meerdere jaren vochtaccumulatie plaatsvindt.
- Het detail betreft een 3D situatie die in 2D is gesimuleerd.

Deze limitaties hebben tot gevolg dat de resultaten uit de simulaties zullen afwijken van een werkelijke situatie. De simulaties dienen ter indicatie van het warmte-, lucht- en vochttransport in het detail aangehouden te worden.

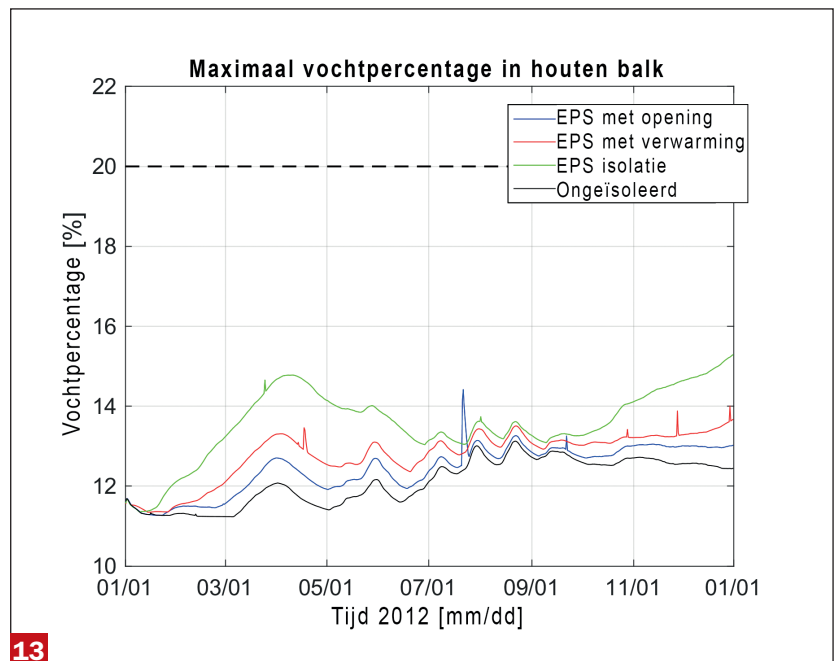
CONCLUSIE

Wanneer hout voor langere tijd wordt blootgesteld aan een hoog vochtigheidspercentage ontstaat er een risico op schimmelvorming en houtrot. Voor het inwendige vochtpercentage en de relatieve vochtigheid nabij het oppervlak gelden grenswaarden van respectievelijk 20% en 80% (de minimaal vereiste omstandigheden voor schimmelgroei en houtrot).

De aansluiting tussen een houten balkkop en metselwerk blijkt een kritisch detail. Met behulp van een simulatie-model in COMSOL multiphysics is dit detail geanalyseerd. Om meer zekerheid over de nauwkeurigheid van het COMSOL model te krijgen, is vooraf een verificatie uitgevoerd. Een 1D constructie is in zowel COMSOL als Delphin gesimuleerd met dezelfde input. Uit de vergelijking van de resultaten blijkt dat de simulaties in COMSOL en Delphin goed overeenkomen.

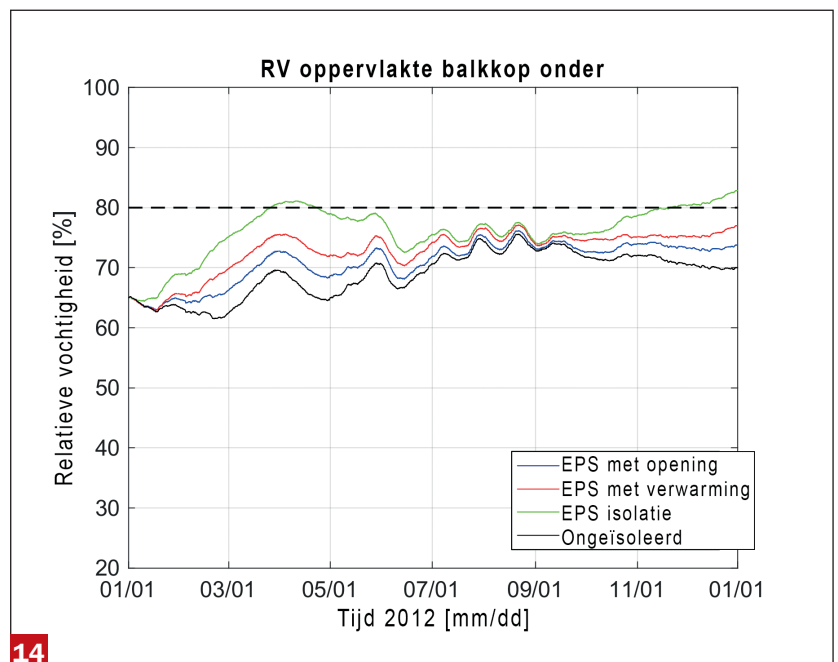
In het onderzoek zijn meerdere varianten van de aansluiting tussen de houten balkkop en het metselwerk gesimuleerd. Te verdelen in drie categorieën: binnenklimaat, isolatietype en constructie type.

De resultaten uit het onderzoek laten zien dat een stabiel binnenklimaat, zoals in een museum, kritischer is dan een binnenklimaat in een woning. Dit verschil uit zich vooral in de zomer, wanneer er actief gekoeld wordt in het museum. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat er zomercondensatie plaatsvindt.



13

Hoogste vochtpercentage in de houten balk. De ongeïsoleerde constructie (zwart) is vergeleken met een volledig geïsoleerde constructie (groen), de constructie met 200 mm opening rondom de balk (blauw) en met actieve verwarming (rood)



14

Relatieve vochtigheid nabij het oppervlak van de houten balkkop. De ongeïsoleerde constructie (zwart) is vergeleken met een volledig geïsoleerde constructie (groen), de constructie met 200mm opening rondom de balk (blauw) en met actieve verwarming (rood)

Wanneer isolatie aan de binnenzijde wordt toegepast, is een duidelijke toename zichtbaar van het inwendige vochtpercentage in de houten balk. Om dit vochtpercentage te reduceren zijn simulaties uitgevoerd met drie verschillende isolatietypes: EPS, XPS en Calcium silicaat. De simulaties zijn uitgevoerd met het museum binnenklimaat (worst-case). Calcium silicaat zorgt voor de hoogste vochtpercentages, gevolgd door EPS. Met XPS worden de laagste vochtpercentages bereikt. Echter voor alle drie de varianten is er een risico op schimmelvorming aangezien de relatieve vochtigheid boven grenswaarde van 80% komt.

De vochtpercentages en daarmee het risico op schimmelvorming en houtrot zijn het beste te verlagen door de constructie te veranderen. Bijvoorbeeld door het toevoegen van een actieve verwarming die de lucht lokaal tot 30°C verwarmt. De eerder gevonden toename van het inwendige vochtpercentage, na één jaar, veroorzaakt door toepassing van isolatie is gehalveerd wanneer actieve verwarming plaatsvindt.

Een andere mogelijkheid is 200 mm rondom de balk vrijhouden van isolatie. Dit is de meest effectieve wijze om het vochtpercentage te verminderen. Na één jaar is de toename van het vochtpercentage slechts een kwart van de oorspronkelijke toename. Een nadeel van deze constructiewijzigingen is de toename van het energiegebruik. Daarnaast zorgt het gat van 200 mm rondom de balk voor een hogere relatieve vochtigheid nabij het binnenoppervlak.

Tot slot zijn de simulaties van vele factoren afhankelijk, zoals het buitenklimaat en opbouw van de constructie. Er zijn in de simulaties ook een aantal aannames gedaan, waardoor de resultaten en conclusies met grote zorgvuldigheid behandeld dienen te worden. ■

BRONNEN

- ▶ [1] Spierenburg, M. (2017), Heat and moisture in wood-bearing of monumental buildings. Master thesis. Technische Universiteit Eindhoven
- ▶ [2] Kehl, D., Ruisinger, U., Plagge, R., & Grunewald, J. (2013), Wooden beam ends in masonry with interior insulation – A literature review and simulation on causes and assessment of decay, Proceedings of 2nd Central European Symposium on Building Physics
- ▶ [3] Guizzardi, M., Derome, D., Vonbank, R. & Carmeliet, J. (2015a), Hygrothermal behavior of a massive wall with interior insulation during wetting, Building and Environment, Vol. 89, pp. 59-71
- ▶ [4] Borsch-Laaks, R. (2006), Innendämmung – Wo ist das Risiko?, WTA-Journal 1/06, pp. 19-42
- ▶ [5] Borsch-Laaks, R. (2009), Balkendurchdringungen in historischen Außenwänden, Hochschule Biberbach, Zukunft Holz, Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotenziale, pp. 883-887
- ▶ [6] Gnoth, S., Jurk, K., & Strangfeld, P. (2005), Hygrothermisches Verhalten eingebetteter Holzbalkenköpfe im innengedämmten Außenmauerwerk, Bauphysik 27, Vol. 2, pp. 117-128
- ▶ [7] Morelli, M., Nielsen, T.R., Scheffler, G.A., & Svendsen, S. (2010), Internal insulation of masonry walls with wooden floor beams in northern humid climate, Proceedings at Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI, pp. 89
- ▶ [8] Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Paajanen, L., & Lähdesmäki, K. (2010a), Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures, Journal of Building Physics, Vol. 33, pp. 201-224, DOI: 10.1177/1744259109343511
- ▶ [9] Guizzardi, M., Carmeliet, J. & Derome, D. (2015b), Risk analysis of biodeterioration of wooden beams embedded in internally insulated masonry walls, Construction and Building Materials, Vol. 99, pp. 159-168
- ▶ [10] Viitanen, H., Toratti, T., Makkonen, L., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Ruokolainen, L., Räsänen, J. (2010b), Towards modelling of decay risk of wooden materials, Eur. J. Wood Prod., Vol. 68, pp. 303-313, DOI: 10.1007/s00107-010-0450-x
- ▶ [11] Goesten, S. (2016), Hygrothermal simulation model: Damage as a result of insulating historical buildings, Master thesis, Technische Universiteit Eindhoven
- ▶ [12] Harrestrup, M. & Svendsen, S. (2016), Internal insulation applied in heritage multi-storey buildings with wooden beams embedded in solid masonry brick façades, Building and Environment, Vol. 99, pp. 59-72

■ BIJNA JE SCRIPTIE AFGEROND?

Schrijf een artikel in Bouwfysica

redactie@nvbv.org

