



Delft University of Technology

Document Version

Final published version

Licence

Dutch Copyright Act (Article 25fa)

Citation (APA)

Vereecken, E., Roels, S., Tenpierik, M. J., & Stappers, M. (2025). Historisch baksteenmetselwerk na-geïsoleerd met kalkhennep. *Bouwfysica Blad*, 2025(2), 2-7.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

In case the licence states "Dutch Copyright Act (Article 25fa)", this publication was made available Green Open Access via the TU Delft Institutional Repository pursuant to Dutch Copyright Act (Article 25fa, the Taverne amendment). This provision does not affect copyright ownership.
Unless copyright is transferred by contract or statute, it remains with the copyright holder.

Sharing and reuse

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

This work is downloaded from Delft University of Technology.

HISTORISCH BAKSTEENMETSELWERK NA-GEÏSOLEERD MET KALKHENNEN

MONITORING EN SIMULATIE VAN EEN CONCREET RESTAURATIEPROJECT

Binnenisolatie is vaak de enige mogelijke na-isolatietechniek om historisch baksteenmetselwerk thermisch te verbeteren. Helaas brengt deze techniek ook schaderisico's met zich mee, zoals bijvoorbeeld vorstschade, schimmelgroei of houtrot van ingewerkte houten elementen. Verder onderzoek is nodig, in het bijzonder rond biobased isolatiesystemen. In dit artikel tonen we een in-situ meetcampagne van het landgoed de Grote Noordijk te Wilp, waarbij het hygrothermische gedrag van massieve metselwerkwanden na-geïsoleerd met kalkhennepisolatie werd opgevolgd. Vervolgens vergelijken we de meetresultaten met de resultaten van numerieke simulaties. De studie werd uitgevoerd in het kader van het onderzoeksproject 'Energetische prestaties van massieve bakstenen gevels in woonhuismonumenten', gesubsidieerd door de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed.



Prof. dr. ir. E. (Evy) Vereecken, KU Leuven, Departement Bouwkunde, Leuven; Koninklijk Instituut voor Kunstpatrimonium (KIK-IRPA), Labo monumenten en monumentale decoratie, Brussel



Prof. dr. ir.-arch. S. (Staf) Roels, KU Leuven, Departement Bouwkunde, Leuven



Prof. dr. ir. M.J. (Martin) Tenpierik, TU Delft, Faculteit Bouwkunde, Delft



Ir. M.H.L. (Marc) Stappers, Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Amersfoort

Om de klimaatverandering een halt toe te roepen, is het van uiterst belang om ons gebouwenpatrimonium energetisch te verbeteren. Volgens de Trias Energetica moet een energetische verbetering starten bij de aanpak van de gebouwschil. Bij historische monumenten is binnenisolatie vaak de enige manier om de thermische prestaties van de gevel te verbeteren. Maar omwille van mogelijke schade fenomenen zoals vorstschade, inwendige condensatie, schimmelgroei of houtrot van ingewerkte houten balken staan eigenaars vaak wat weigerachtig tegen de toepassing van binnenisolatie. De afgelopen decennia werden ook diverse 'nieuwe' types (biobased) binnenisolatiesystemen ontwikkeld en deze worden vaak gepresenteerd als interessante systemen om mogelijke risico's te verminderen. Meer kennis rond deze systemen is echter nodig. Het energetisch besparingspotentieel van binnenisolatie maximaal benutten, vraagt om een betrouwbare risico-analyse die de energetische verbetering afweegt ten opzichte van mogelijke risico's op schade. Meetcampagnes bieden waardevolle informatie over het hygrothermische gedrag van binnenisolatiesystemen, alsook mogelijke schadepatronen, maar zijn tijdrovend en laten een analyse van slechts een beperkt aantal configuraties en randvoorwaarden toe. Hygrothermische simulaties laten een

analyse van verschillende configuraties en randvoorwaarden toe, met inbegrip van studies naar de mogelijke impact van klimaatverandering, en spelen dus een belangrijke rol bij risico-analyses.

In het kader van het onderzoeksproject werd de restauratie van het landgoed de Grote Noordijk in Wilp nauwgezet opgevolgd. Voor het restauratieproject werd een meetcampagne opgezet die het hygrothermisch gedrag van het toegepaste binnenisolatiesysteem, bestaande uit kalkhennep, nauwkeuring monitort. Deze meetresultaten werden vervolgens vergeleken met de resultaten bekomen via numerieke simulaties. Dit laat toe om niet alleen de werkelijke prestaties van het binnenisolatiesysteem te evalueren, maar ook om de mogelijkheden én beperkingen van hygrothermische simulatiemodellen te onderzoeken. Het eerste deel van dit artikel beschrijft de meetcampagne van het restauratieproject Grote Noordijk. In het tweede deel komen de overeenkomstige numerieke simulaties aan bod.

MEETCAMPAGNE

Restauratieproject 'Grote Noordijk'

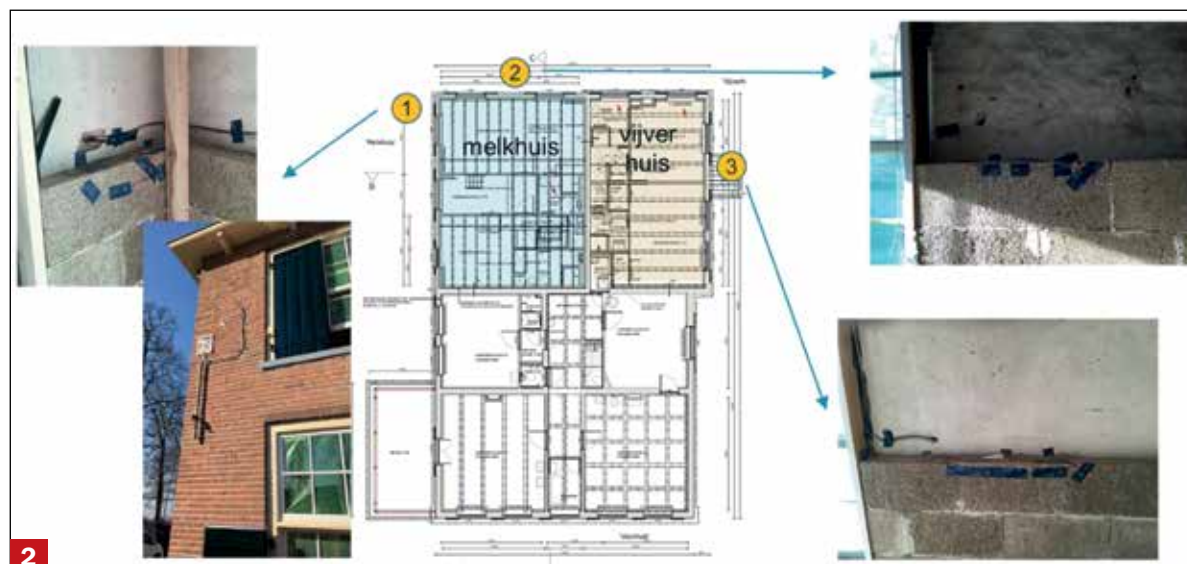
Grote Noordijk is een landgoed in de provincie Gelderland in Nederland. Eind 17^{de} eeuw stond op deze plek een boerderij die in de loop der eeuwen is uitgebreid tot een groot land-



1



Links: buitengevels na restauratie van Melkhuis en Vijverhuis van het landgoed de Grote Noordijk in Wilp, rechts: binnenzicht na restauratie, met op de kleine foto de toestand tijdens het plaatsen van de binnenisolatie en de meetsensoren.

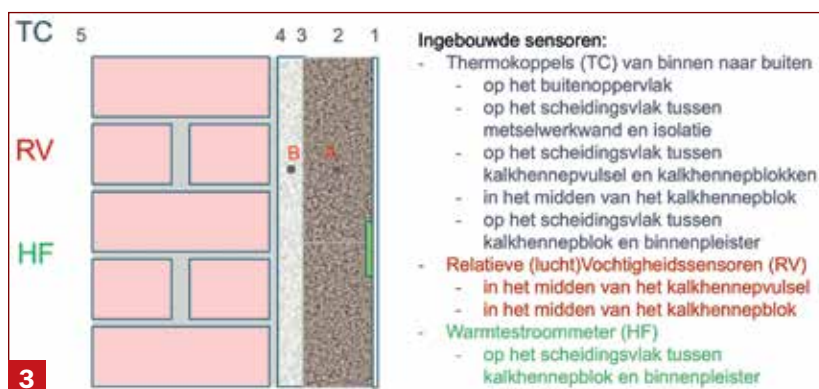


Plaatsing van kalkhennep binnenisolatie en meetsensoren tijdens de restauratiefase op drie posities (1) zuidgevel, (2) westgevel en (3) noordgevel.

goed met een voorname woning. Rond 1750 is de boerderij uitgebreid met een landheerkamer en in 1807 is de boerderij verbouwd tot een landhuis in neoclassicistische stijl. Sinds 1985 heeft het landhuis geregeld leeg gestaan en raakte het in verval. In 2020 is begonnen om het landgoed in oude luister te herstellen waarbij de diverse gebouwen op het landgoed een grondige restauratie ondergaan. Het landhuis is inmiddels opgedeeld in een aantal wooneenheden waarbij de eigenaren het Voorhuis in gebruik houden als familiehuis en het Melkhuis en Vijverhuis verhuurd worden. In het voorjaar van 2022 zijn beide achtergebouwen van dit landgoed grondig gerenoveerd, waarbij naast dakisolatie ook de wanden voorzien zijn van binnenisolatie (figuur 1).

De oorspronkelijk gevels van het Melk- en Vijverhuis bestaan uit massief steens metselwerk met een dikte van ongeveer 21 cm. De gevel was op verschillende plekken voorzien van een cementstuclaag aan de binnenzijde. Bij een bezoek aan het project in de zomer van 2021 was merkbaar dat de muren vrij nat stonden, mogelijk als gevolg van optrekkend vocht. Om droging te versnellen is de stuclaag deels verwijderd en zijn verwarmings- en drogingsunits geplaatst. Tevens is in de zomer van 2021 de fundering rondom uitgegraven, zijn alle doorvoeropeningen in de fundering gedicht en is de funderingsvoet waterdicht gemaakt tot een diepte van 50 cm onder het maaiveld. Verder zijn er nieuwe regenpijpen aangebracht of hersteld waardoor deze niet meer tegen de gevel lozen maar direct in de naastgelegen vijver. Daarnaast zijn de voegen en openingen in de gevels hersteld, is er een nieuwe dakgoot aangebracht en is het dak geïsoleerd. Verder wordt het pand sinds de start van de restauratie goed geventileerd. Het doel van deze maatregelen was mede het wegnemen van mogelijke vochtbronnen in de gevel. Het aanbrengen van binnenisolatie (tegen het metselwerk aan) is namelijk risicovol indien er sprake is van optrekkend vocht of indien er een andere belangrijke vochtbron aanwezig is die de muur nat houdt.

Bij de restauratie zijn aan de binnenzijde kalkhennepblokken van 9 cm dik geplaatst op een afstand van 3 cm van de bestaande gevel. De tussenruimte is opgevuld met losse kalkhennepvezels. De kalkhennepblokken zijn aan de binnenzijde afgewerkt met een pleister van 1 cm. Bij metingen in het lab van de KU Leuven bleek echter dat deze



Schematische voorstelling van de wand met binnenisolatie en ingebouwde meetsensoren.

pleister over een dikte van ongeveer 0,5 cm in de blokken is getrokken waardoor de blokken eerder een effectieve dikte hebben van 8,5 cm en de pleister van 1,5 cm.

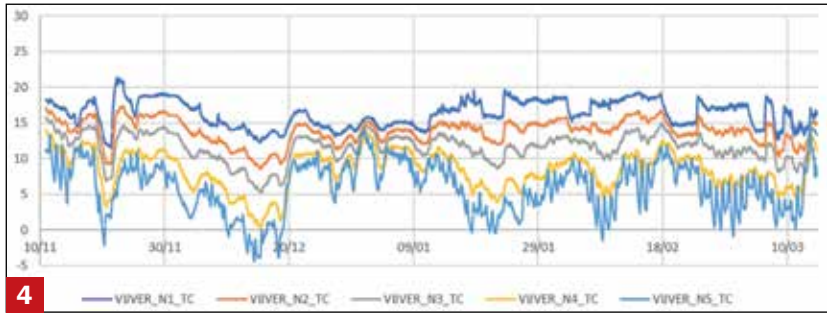
Monitoring van de prestaties

Figuur 2 toont de beide achtergebouwen tijdens de restauratiefase. Tijdens deze fase zijn op drie locaties (telkens op de eerste verdieping van de zuid-, west- en noordgevel) meetsensoren ingebouwd in de wand. De temperatuur is opgemeten op alle scheidingsvlakken, de Relatieve (lucht)Vochtigheid (RV) in het midden van de kalkhennepblokken en in het kalkhennepvulsel en de warmtestroom tussen kalkhennepblok en binnenpleister. Figuur 3 geeft een schematische voorstelling van de wand met de posities van de meetsensoren.

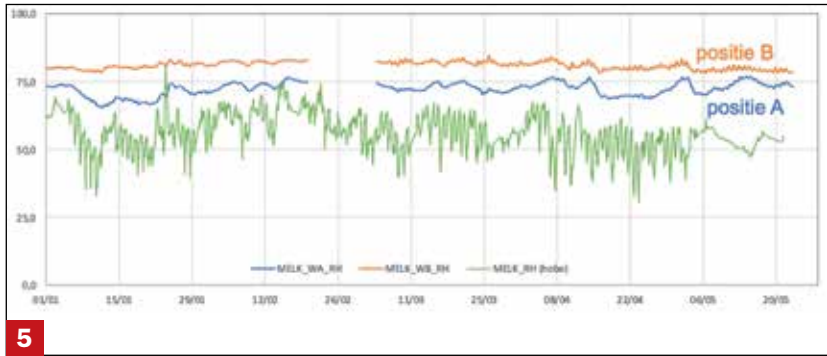
Meetresultaten

In een korte meetcampagne voor restauratie werd de Rc-waarde van de ongeïsoleerde metselwerkwand bepaald op basis van opgemeten warmtestromen en oppervlakte-temperaturen. Voor de noordzijde leverde dit een Rc-waarde van $0,38 \text{ m}^2\text{K/W}$ op, wat goed overeenkomt met de theoretische waarde op basis van de warmtegeleidingscoëfficiënt van de bakstenen ($0,545 \text{ W/mK}$). Aan de westzijde lag de waarde aanzienlijk lager ($0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$) wat kan toegeschreven worden aan het feit dat de wand over nagenoeg de volledige dikte nat stond.

Een gelijkwaardige analyse is uitgevoerd na het isoleren van de wanden aan de hand van de opgemeten tempera-



4 Opgemeten temperaturen (°C) in de noordwand (Vijverhuis) tijdens de winter van 2022-2023.



5 Opgemeten RV in de kalkhennepisolatatie in de westgevel (Melkhuis) van januari tot eind mei 2024.

tuurprofielen. Figuur 4 toont, bij wijze van voorbeeld, de opgemeten temperaturen voor de noordwand van het Vijverhuis (zie meetpositie 3 in figuur 2) voor de winter van 2022-2023. De volgorde van de lijnen (van onder naar boven) komen daarbij overeen met de meetpunten 1 tot 5 zoals weergegeven in figuur 3.

Uitmiddelen van de opgemeten warmtestromen door de wand in combinatie met het gemeten temperatuurprofiel laat toe om de stationaire Rc-waarde te bepalen. Deze blijkt aanzienlijk lager te liggen dan wat verwacht werd. De verkregen Rc-waarden voor de verschillende posities bedragen ongeveer 1,1 à 1,2 m²K/W terwijl het aangebrachte isolatiepakket alleen, op basis van NTA8800, een theoretische weerstand zou moeten hebben van ongeveer 1,5 m²K/W. Het feit dat deze waarde niet gehaald wordt, kan toegeschreven worden aan een combinatie van factoren: 1) de dikte van de blokken is iets minder dan ontworpen en de warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal blijkt iets hoger te zijn dan op de technische fiche van de fabrikant en 2) de theoretische waarde gaat uit van een droog materiaal terwijl de kalkhennepblokken (en vulsel) in de praktijk blootgesteld zijn aan een hoge RV. Figuur 5 toont de opgemeten RV in het midden over de dikte van de blokken en in het midden van het vulsel (respectievelijk A en B in figuur 3) voor de westgevel

(meetpositie 2 in figuur 2) sinds januari 2024. Voor de volledigheid is ook de RV in de binnenomgeving (groene lijn) meegegeven. Het is duidelijk dat de RV van de kalkhennep nagenoeg continu meer dan 70% bedraagt en dichter tegen de oude metselwerkwand meer dan 80%.

NUMERIEKE SIMULATIES

Numerieke simulaties laten toe om risico-analyses uit te voeren voor verschillende configuraties en randvoorwaarden. Om een beter zicht te krijgen op de betrouwbaarheid en het potentieel van numerieke simulaties voor de beoordeling van binnenisolatiesystemen werden de resultaten van de meetcampagne aangevuld met een uitgebreide numerieke simulatie. Daartoe is gebruik gemaakt van zowel de software Delphin als WUFI 2D, de twee meest gangbare en commercieel beschikbare softwarepakketten. Beide modellen laten toe om het hygrothermisch gedrag van een bouwdeel te simuleren, maar verschillen enigszins in implementatie van zowel de vergelijkingen, de randvoorwaarden als de materiaaleigenschappen. De verkregen resultaten van de numerieke simulaties zijn vergeleken met de gemeten hygrothermische respons van de gevel. De gesimuleerde opbouw van de gevel is identiek aan de opbouw in figuur 4 met dien verstande dat de baksteenmuur is vereenvoudigd tot een homogene laag van baksteen waarbij de voegen verwaarloosd worden. Er is uitgegaan van een 1-dimensionale situatie. In dit artikel zullen alleen de resultaten besproken worden van de zuidgevel van het Melkhuis die de hoogste slagregenbelasting ondervindt en bijgevolg de meest kritische situatie weergeeft.

Materialen, randvoorwaarden en methode

De materiaaleigenschappen van de baksteen en kalkhennepisolatatie werden opgemeten in het laboratorium Bouwfysica en Duurzaam Bouwen van KU Leuven. Hiertoe zijn kwikintrusie porosimetrie, hygroscopische sorptie, vacuümsaturatie, en warmtegeleidingsmetingen verricht. Een overzicht van de verschillende eigenschappen wordt weergegeven in tabel 1, tabel 2 en figuur 6. Voor de baksteen werd de vochtdiffusiviteit bepaald op twee manieren: 1) op basis van de vereenvoudigde Kießl-Künzel methode [1], waarbij gebruik wordt gemaakt van de capillaire absorptiecoëfficiënt en het capillaire vochtgehalte en 2) via de 'liniaal methode' [2] waarbij informatie over de hoogte van het vochtfront in rekening gebracht wordt. Aangezien in de praktijk onder normale omstandigheden niet wordt verwacht dat een vochtgehalte boven het capillaire vochtgehalte wordt bereikt, werd voor de vochttopslag en -transporteigenschappen in de numerieke simulaties het capillaire vochtgehalte als bovengrens gehanteerd.

Tabel 1: Materiaaleigenschappen

Eigenschap	Baksteen (Melkhuis)	Cementeringslaag	Kalkhennep blokken	Kalkhennep vulsel	Pleisterlaag
Massadichtheid (kg/m³)	1629,9	1876,1*	345	285	1200*
Open porositeit (%)	38,7		41	50	
Waterabsorptiecoëfficiënt A_{cap} (kg/m²s ^{0.5})	0,355	0,04*	0,0736*	0,0736*	0,05*
Capillair vochtgehalte w_{cap} (kg/m³)	252,5	205,1*	177	177	320,7*
Soortelijke warmte c_p (J/kgK)	850*	758*	1560*	1560*	840*
Dampdiffusieweerstand μ (-)	Dry: 5*	Dry: 41,28*	30% RV: 3,7 90% RV: 3,3	30% RV: 3,7 90% RV: 3,3	12*

(*eigenschappen op basis van de Delphin/WUFI 2D database of van technische productiefiches; overige: labometingen uitgevoerd door KU Leuven)

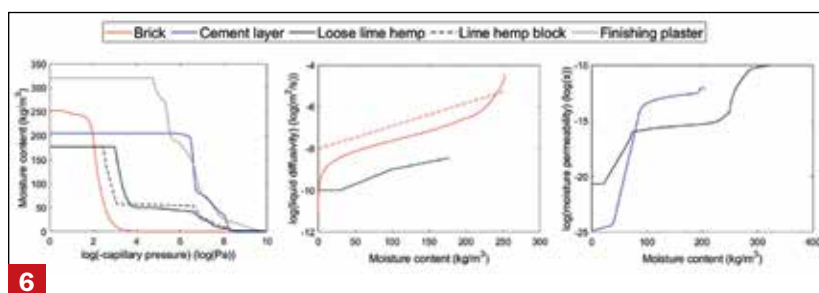
Tabel 2: Warmtegeleidingscoëfficiënt in W/mK

Temperatuur (°C)	Baksteen (Melkhuis)	Cementerings-laag	Kalkhennep blokken	Kalkhennep vulsel	Pleister-laag
-0,1 (droog)	0,564	0,803*			0,73*
9,9 (droog)	0,578		0,078	0,066	
19,9 (droog)	0,592		0,081	0,069	
29,9 (droog)	0,597		0,084	0,072	
39,9 (droog)	0,602				
9,9 (nat @97% RV)			0,125	0,113*	
19,9 (nat @97% RV)			0,129		
29,9 (nat @97% RV)			0,135		

(*eigenschappen op basis van de Delphin/WUFI 2D database of van technische productiefiches; overige: labometingen uitgevoerd door KU Leuven)

Voor de randvoorwaarden aan de buitenzijde zijn de klimaatgegevens van een nabijgelegen KNMI weerstation (Deelen en Heino) gebruikt. Slagregen op de gevel is in Delphin geïmplementeerd via de horizontale neerslag uit de weergegevens en het regenmodel uit NEN EN ISO 15927-3 [3] en in WUFI via het regenmodel uit ASHRAE 160 [4]. De regenblootstellingscoëfficiënt is ingesteld op 0,7, wat de voorgestelde waarde is voor beschutte gebouwen met een hoogte lager dan 10 meter [3][5]. Aan de buitenkant is uitgegaan van een standaard warmteoverdrachtscoëfficiënt van 25 W/m²K en een emissiviteit voor langgolvlige straling van 0,9. De absorptiecoëfficiënt van het gebouwoppervlak voor kortgolvlige straling is ingesteld op 0,56. De overdrachtscoëfficiënt voor vochttransport aan het buitenoppervlak is bepaald op basis van de Lewis-correlatie, wat een waarde van $1,22 \times 10^{-7}$ s/m oplevert. Voor periodes zonder gemeten binnentemperatuur is aangenomen dat de binnentemperatuur gelijk was aan 18°C in het geval van een buitentemperatuur onder de 10°C, en gelijk was aan 23°C in het geval van een buitentemperatuur boven de 20°C. In het tussengebied is een lineaire interpolatie tussen toegepast. Deze aanname is gedaan omdat de woningen niet of nauwelijks bewoond waren. Voor periodes met een gemeten binnenoppervlaktetemperatuur is de binnenluchttemperatuur geschat op basis van deze gemeten oppervlaktetemperatuur en de gemeten warmtestroomdichtheid. De waterdampspanning binnen is verondersteld 300 Pa hoger te zijn dan de waterdampspanning buiten. Gedurende de meetcampagne was de woning niet of beperkt bewoond en werd er goed geventileerd waardoor er binnen geen tot nauwelijks vochtproductie was. Er was echter wel enig bouwvocht aanwezig. De warmteoverdrachts-coëfficiënt aan het binnenoppervlak is op 7,8 W/m²K gezet. De overdrachtscoëfficiënt voor vochttransport is opnieuw bepaald met de Lewis-correlatie. De impact van een aantal aannames in de modelinput is onderzocht, namelijk:

- I. Delphin + WUFI: de invloed van de gekozen simulatiesoftware: op basis van identieke basisinvoer worden de resultaten van de numerieke simulaties uit Delphin en WUFI met elkaar en met de gemeten hygrothermische respons van de gevel vergeleken.
- II. Delphin: de potentiële invloed van de weergegevens, meer specifiek de slagregenbelasting. Voor de randvoorwaarden aan de buitenkant zijn de klimaatgegevens van twee verschillende KNMI weerstations nabij Wilp, namelijk Deelen en Heino, gebruikt en met



Vochtretentiecurves (links) en vochttransporteigenschappen (midden en rechts) gebruikt in de numerieke simulaties. Er dient opgemerkt te worden dat de curves getoond worden (en gebruikt werden) tot capillair vochtgehalte. De rode gestippelde curve (midden) geeft de vochtdiffusiviteit op basis van de vereenvoudigde Kieβl-Künzel vergelijking.

elkaar vergeleken. Daarnaast is de impact van de regenblootstellingsfactor bestudeerd.

- III. Delphin + WUFI: de potentiële invloed van vereenvoudigde of veronderstelde materiaaleigenschappen. De invloed van een vereenvoudigde benadering voor de diffusiviteit van de baksteen (Kieβl-Künzel-methode versus Liniaal (Ruler) methode) is geanalyseerd. Daarnaast zijn ter vergelijking bakstenen uit de Delphin/WUFI database met een capillaire absorptiecoëfficiënt en capillair vochtgehalte vergelijkbaar de waarden voor de echte baksteen geselecteerd (zie Tabel 3) en gebruikt voor het modelleren van de testcase.

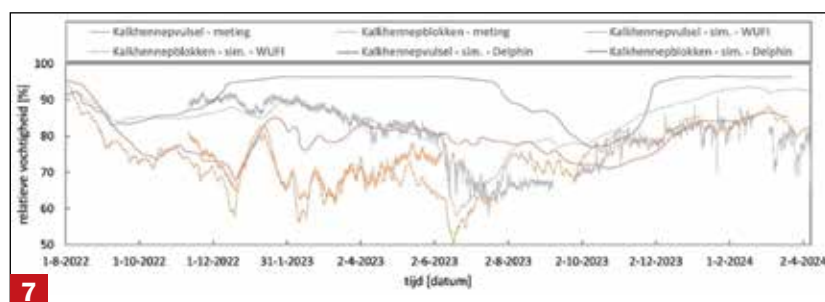
Het is belangrijk om op te merken deze studie niet volledig wou zijn, maar modelleers bewust wou maken van de potentiële impact van aannames in numerieke modellering. Andere aspecten, zoals aannames met betrekking tot bijvoorbeeld de kalkhennep- en cementeringslaag, het binnenklimaat, evenals de eendimensionale benadering, kunnen ook afwijkingen veroorzaken en dus een afwijking van de gemeten gegevens verklaren.

Vergelijking tussen Delphin en WUFI simulatieresultaten en meetresultaten

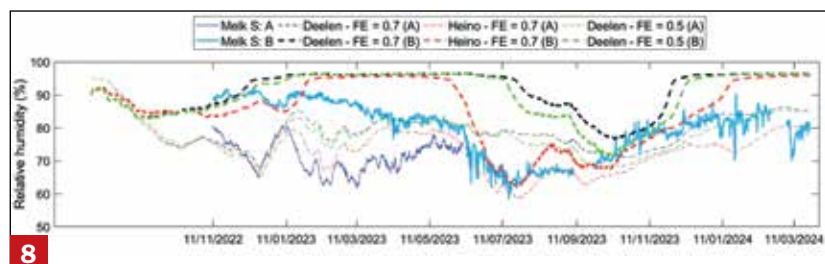
Figuur 7 toont de resultaten van de simulaties in Delphin en WUFI in vergelijking tot de gemeten hygrothermische respons. Voor beide modellen is dezelfde input en de meteorologische data van KNMI weerstation Deelen gebruikt. De voorspelling van de RV in het kalkhennepvulsel en in de kalkhennepblokken valt hoger uit met de Delphin simulaties dan met de WUFI simulaties. De resultaten van de WUFI simulaties liggen dicht bij de gemeten hygrothermische respons van de met slagregen belaste zuidgevel. Een precieze duiding van deze verschillen is moeilijk te

Tabel 3: Eigenschappen van de bakstenen uit de Delphin en WUFI database: capillaire absorptiecoëfficiënt (A_{cap}), capillair vochtgehalte (w_{cap}) en vacuumverzadigd vochtgehalte (w_{sat})

Materiaal	ID	A_{cap} (kg/m ² s ^{0.5})	w_{cap} (kg/m ³)	w_{sat} (kg/m ³)
Old Building Brick Dresden ZH	496	0,260	209	282,5
Old Building Brick Rote Kaserne Potsdam (inner brick 2)	97	0,278	266	319
Historical Brick (cluster 4)	542	0,336	200	340
Solid Brick Historical (Fraunhofer IBP)	Baksteen 1	0,39	230	310
Solid Brick Hand-formed (Fraunhofer IBP)	Baksteen 2	0,35	200	380



Delphin en WUFI simulatieresultaten versus meetresultaten: RV in de kalkhennepblokken en de losse kalkhennepvulling (respectievelijk Positie A en B in Figuur 3).



Meetresultaten voor de zuidwand (Melk S) versus Delphin simulatieresultaten op basis van verschillende meteodata (Deelen versus Heino) en regenbloomstellingsfactor (A = kalkhennepblokken, B = kalkhennepvulling, FE = regenbloomstellingsfactor).

geven maar lijkt te maken te hebben met hoe de slagregenbelasting meegenomen wordt in beide simulatiemodellen. Extra info in verband met de verschillen tussen Delphin en WUFI kan teruggevonden worden in [7,8].

Potentiële impact van meteogegevens

Figuur 8 vergelijkt de RV in het kalkhennepvulling en in de kalkhennepblokken van de simulatie met weergegevens van Deelen met de respons die is verkregen op basis van de meteodata van het weerstation in Heino. Hoewel beide weerstations zich relatief dicht bij het restauratieproject en in vergelijkbaar landelijk gebied bevinden (Deelen 23 km en Heino 26 km hemelsbreed), is er een groot verschil waarneembaar, vooral in neerslag in de zomer. De numerieke resultaten vanuit Delphin blijken zeer gevoelig te zijn voor de slagregenbelasting, wat het belangrijkste verschil is tussen beide locaties. Op basis van de meteogegevens van Deelen is de gesimuleerde RV in de losse kalkhennep veel hoger dan de gemeten RV. De RV die wordt bereikt bij gebruik van de meteogegevens van Heino, die een lagere regenbelasting omvatten, is in de winter nog steeds vrij hoog; in de zomer liggen de resultaten meer in lijn met de metingen. Bij het verlagen van de regenbloomstellingsfactor

van 0,7 naar 0,5 resulteren de meteogegevens van Deelen nog steeds in een te hoge RV. Omdat de meteogegevens van Heino in Delphin beter overeenkomen met de gemeten hygrothermische respons, worden voor Delphin hierna de meteogegevens van Heino gebruikt. Omdat in WUFI de resultaten van het weerstation in Deelen goede resultaten opleveren, zijn verder in dit artikel de meteogegevens van Deelen bij simulaties met WUFI gebruikt.

Potentiële impact van materiaaleigenschappen

Figuren 9 tot en met 12 tonen de invloed van de materiaaleigenschappen op de hygrothermische respons van de gevel. Zoals te zien in de Figuren 9 (Delphin) en 10 (WUFI) zit er een groot verschil in de uitkomsten bij gebruik van invoer op basis van gedetailleerde meting van de vochtdiffusiviteit op basis van de liniaal (Ruler) methode [2] en op basis van de vereenvoudigde Kießl-Künzel methode (zie formule (1)).

$$D_w = D_{wp} \cdot \exp(a_{De} \cdot w) \quad (1)$$

$$\text{met } D_{wp} = 6,74 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{A_{cap}}{w_{cap}} \right)^2; a_{De} = \frac{6,4}{w_{cap}} \quad (2)$$

Over het algemeen liggen de resultaten met de vereenvoudigde methode verder af van de metingen dan met de nauwkeurigere methode. Tevens, zoals te zien in de Figuren 11 (Delphin) en 12 (WUFI), geven bakstenen uit de software database, ook al is bij de selectie hiervan gelet op de capillaire waterabsorptiecoëfficiënt en het capillaire vochtgehalte, resultaten die sterk afwijken van de simulaties op basis van de echte baksteen.

DISCUSSIE EN BESLUIT

Binnen een meetcampagne bij het restauratieproject de Grote Noordijk werd het hygrothermisch gedrag van met kalkhennep na-geïsoleerd massief metselwerk opgevolgd. Uit de metingen bleek dat de werkelijke prestaties niet helemaal overeenkomen met de verwachte. In de winterperiodes schommelt de RV in de binnenisolatie nagenoeg continu rond de 70 à 80%. Dit is ondermeer te wijten aan het feit dat de kamers maar beperkt verwarmd zijn en de RV van de binnenomgeving aan de hoge kant is. Bovendien is de oorspronkelijke metselwerkwand aan de binnenzijde voorzien van een cementbepleistering die uitdroging naar de buitenomgeving bemoeilijkt. De hoge RV in de binnenisolatie maakt dat de warmteweerstand van de kalkhennep lager is dan ingeschat. Dit, in combinatie met iets dunnere blokken en het indringen van de binnenpleister in de blokken, resulteert in een eerder beperkte verbetering van de thermische prestaties van de wanden. Dit toont het belang van een multidisciplinaire aanpak waarbij bij voorkeur kennis van een architect, een bouwhistoricus, een bouw fysicus en een aannemer samengevoegd wordt. Bovendien is het belangrijk om altijd het totale systeem te bekijken, van bestaande wand (met eventuele binnen- en buitenafwerking) tot en met binnenisolatiesysteem en uiteindelijke binnenafwerking. Een metselwerkwand nageïsoleerd met binnenisolatie is immers een samengestelde wand die in alle seizoenen correct moet presteren.

Uit de numerieke simulaties blijkt vooral dat het zeer moeilijk is om de gemonitorde hygrothermische respons van een baksteengevel met binnenisolatie met numerieke modellen voldoende nauwkeurig na te bootsen. De nauw-

keurigheid van de input in de modellen is van groot belang en zelfs bij een nauwkeurige input kan het verschil tussen gemeten en gesimuleerde respons groot zijn. Bij de onderzochte casus bleken de randvoorwaarden (bijvoorbeeld slagregenbelasting) een belangrijke invloed op de resultaten te hebben. Twee weerstations in relatieve nabijheid van de casus vertoonden grote verschillen in neerslag. Door deze grote onzekerheid in regenbelasting is het lastig om een goede inschatting te maken van de hygrothermische respons bij slagregenbelasting. Voor gevels waarbij deze belasting een grote rol speelt, verdient het daarom aanbeveling om de slagregenbelasting op de gevel direct ter plaatse te meten.

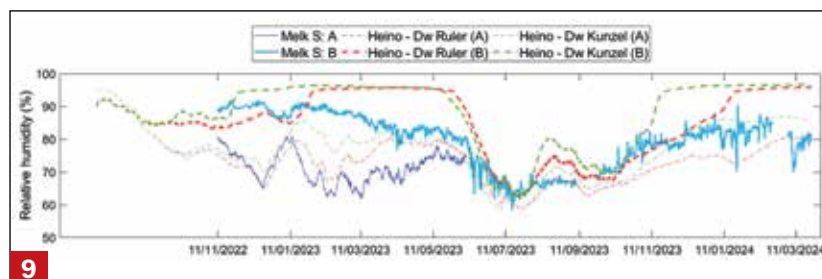
Naast de randvoorwaarden hadden de materiaaleigenschappen een belangrijke impact op de simulatieresultaten. Het inschatten van de vochttransporteigenschappen op basis van een vereenvoudigde methode of op basis van een vergelijkbaar materiaal uit de materialendatabase, zelfs indien bij het selecteren gebruik gemaakt wordt van in het laboratorium opgemeten capillaire waterabsorptiecoëfficiënt en capillair vochtgehalte, geeft onvoldoende informatie om nauwkeurige simulatieresultaten te verkrijgen.

Voorzichtigheid is daarom geboden bij het gebruik van numerieke tools om de hygrothermische risico's van nisolatie van gevels met binnenisolatie in te schatten. Probabilistische studies die rekening houden met (on)nauwkeurigheden en onzekerheden zijn daarom aan te bevelen. Drie belangrijke conclusies zijn daarom:

- Bij numerieke simulaties hebben de invoergegevens (materiaaleigenschappen, het buiten- en binnenklimaat, etc.) een belangrijk impact op de resultaten.
- Het gebruik van opgemeten eigenschappen in de simulaties is aan te raden. Eigenschappen uit de software database kunnen afwijkingen als gevolg hebben.
- Wanneer geen gedetailleerde invoergegevens beschikbaar zijn is een probabilistische aanpak wenselijk of noodzakelijk, en dienen onzekerheden in acht genomen te worden. ■

BRONNEN

- [1] Künzle, H., 1995, Simultaneous heat and moisture transport in building components, Fraunhofer IRB Verslag Stuttgart
- [2] Ren, P, e.a., 2019, Hygric properties of porous building materials (V): Comparison of different methods to determine moisture diffusivity, Building and Environment, vol. 164, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106344
- [3] ISO, ISO 15927-3, 2009, Hygrothermal performance of buildings – Calculation and presentation of climate data – Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data.
- [4] ASHRAE, ASHRAE 160, Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings, 2016.
- [5] Straube, J., e.a., 2000, Simplified prediction of driving rain on buildings, Proceedings of the International Building Physics Conference, 18, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, No. 21.09.
- [6] SO, ISO 13788, 2012, Hygrothermal performance of building components and building elements – International surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods.



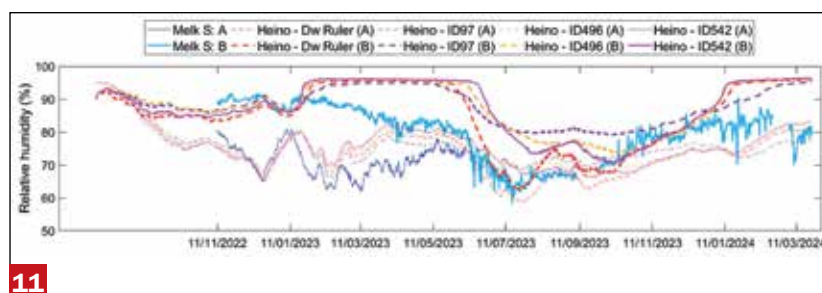
9

Meetresultaten voor de zuidwand (Melk S) versus Delphin simulatieresultaten met voor de baksteen vochttransporteigenschappen op basis van de liniaal (Ruler) methode en de vereenvoudigde Kieβl-Künzel methode (A = kalkhennepblokken, B = kalkhennepvulsel).



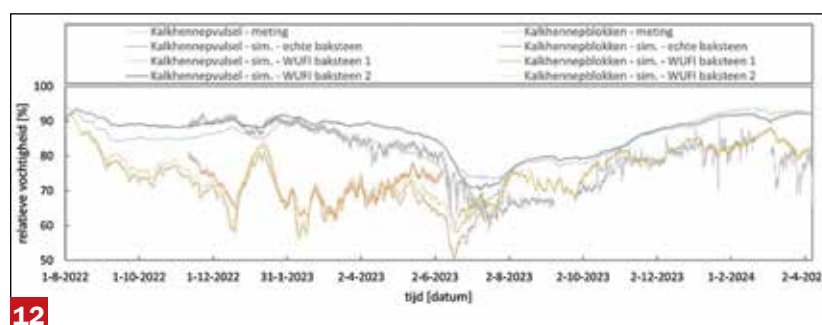
10

Meetresultaten voor de zuidwand (Melk S) versus WUFI simulatieresultaten met voor de baksteen vochttransporteigenschappen op basis van de liniaal methode en de vereenvoudigde Kieβl-Künzel methode (A = kalkhennepblokken, B = kalkhennepvulsel).



11

Meetresultaten voor de zuidwand (Melk S) versus Delphin simulatieresultaten: invloed van opgemeten baksteeneigenschappen versus bakstenen uit de Delphin database (A = kalkhennepblokken, B = kalkhennepvulsel).



12

Meetresultaten voor de zuidwand (Melk S) versus WUFI simulatieresultaten: invloed van opgemeten baksteeneigenschappen versus bakstenen uit de WUFI 2D database (A = kalkhennepblokken, B = kalkhennepvulsel).

- [7] Dang, X., e.a., 2024. Impact of semi-empirical methods implemented in heat, air, and moisture (HAM) models on predicted wind-driven rain (WDR) load and hygrothermal responses, Building and Environment, vol.261,111770, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111770.
- [8] Dang, X., e.a., 2025. A state-of-the-art empirical round robin validation of heat, air and moisture (HAM) models, Building and Environment, vol.276, 112867, doi: 10.1016/j.buildenv.2025.112867.