

Hygrothermische modellering van baksteenmetselwerk in functie van na-isolatie van woonhuismonumenten

Tenpierik, Martin; Roels, Gustaaf

Publication date

2023

Document Version

Final published version

Published in

Duurzaam behoud van massief baksteenmetselwerk in monumenten

Citation (APA)

Tenpierik, M., & Roels, G. (2023). Hygrothermische modellering van baksteenmetselwerk in functie van na-isolatie van woonhuismonumenten. In R. Hayen, W. Quist, & R. van Hees (Eds.), *Duurzaam behoud van massief baksteenmetselwerk in monumenten* WTA Nederland - Vlaanderen.

Important note

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

Copyright

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.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

HYGROTHERMISCHE MODELLERING VAN BAKSTEENMETSELWERK IN FUNCTIE VAN NA-ISOLATIE VAN WOONHUISMONUMENTEN

Martin Tenpierik, TU Delft en Staf Roels, KU Leuven

Abstract

Omwille van de doemscenario's die soms de ronde doen en de veelheid aan mogelijke binnenisolatiesystemen die elk pretenderen dé oplossing te zijn, is het voor eigenaars van woonhuismonumenten vaak moeilijk om te besluiten of na-isolatie een veilig keuze is voor hun gebouw en welk systeem dan de voorkeur geniet. Een betrouwbare hygrothermische modellering zou eigenaars en bewoners kunnen helpen in die beslissing. Hygrothermische simulaties kunnen niet enkel een correcter beeld geven van de verbeterde thermische prestaties, ze laten ook toe om risico's op eventuele schadefenomenen correcter in te schatten. In dit artikel beschrijven we enerzijds een concrete casus waarbij via een intensieve meetcampagne de hygrothermische prestaties van het na-isolatiesysteem opgevolgd worden. Dit laat toe om de resultaten van numerieke voorspellingen te vergelijken met opgemeten prestaties. Daarnaast besteden we aandacht aan hoe we kunnen omgaan met de vele onzekerheden die inherent aanwezig zijn bij de hygrothermische modellering van na-isolatiesystemen voor woonhuismonumenten. Deze onzekerheden meenemen in de simulaties kan helpen om de meest robuuste oplossingen te bepalen.

1. Inleiding

Voor beschermde woonhuismonumenten is binnenisolatie vaak de enige manier om de thermische prestaties van het massief metselwerk te verbeteren. Maar omwille van mogelijke schadefenomenen zoals vorstschade, inwendige condensatie, schimmelgroei of houtrot van ingewerkte houten balken staan eigenaars vaak wat weigerachtig tegen de toepassing van binnenisolatie. Om tegemoet te komen aan de maatschappelijke uitdagingen, zoals klimaatsverandering, moeten we echter proberen om ook waardevolle woonhuismonumenten binnen de mogelijkheden energetisch te optimaliseren. Het energetisch besparingspotentieel van binnenisolatie maximaal benutten vraagt om een betrouwbare risico-analyse die energetische verbetering afweegt ten opzichte van mogelijke risico's op schade. Hygrothermische simulaties kunnen daarbij een belangrijke rol spelen. In het kader van een onderzoeksproject gefinancierd door de Rijksdienst voor Cultureel Erfgoed, Nederland [1], worden enkele case studies van renovatieprojecten nauwgezet opgevolgd. Zo is tijdens de renovatiecampagne van het landgoed de Grote Noordijk in Wilp een meetcampagne opgezet die het hygrothermisch gedrag van het toegepaste binnenisolatiesysteem nauwkeuring monitort. Dit laat toe om niet alleen de werkelijke prestaties van het binnenisolatiesysteem te evalueren, maar ook om de mogelijkheden én mogelijke beperkingen van hygrothermische simulatiemodellen te onderzoeken. Het eerste deel van dit artikel beschrijft de meetcampagne in het specifieke renovatieproject en de bijhorende numerieke simulaties. Ondanks de doorgedreven meetcampagne blijkt dat er altijd onzekerheden blijven bestaan over specifieke materiaaleigenschappen, klimaatbelasting, enz.. Daarom wordt in het tweede deel van dit artikel ingegaan hoe met deze onzekerheden kan omgegaan worden. Door de onzekerheden op te delen afhankelijk van hun aard kan een gelaagde probabilistische analyse doorgevoerd worden die toelaat om verschillende mogelijke oplossingen eerlijk en gestructureerd met elkaar te vergelijken.

2. Hygrothermische modellering van een concrete case: het landgoed de Grote Noordijk in Wilp.

In het kader van het lopende project 'Energetische prestaties van massieve bakstenen gevels in woonhuismonumenten' onderzoeken TU Delft en KU Leuven voor de Rijksdienst voor Cultureel Erfgoed Nederland het bouwfysisch gedrag van binnenisolatie van historisch baksteenmetselwerk. Dit onderzoek omvat een uitgebreide in-situ meetcampagne van de thermische prestatie van massieve historische metselwerkgevels en van de luchtdichtheid van woonhuismonumenten. Tevens vindt in het laboratorium van de KU Leuven een uitgebreide karakterisering van de hygrothermische eigenschappen van historische bakstenen plaats. Daarnaast bevat het ook case studies waarbij de werkelijke prestaties van na-isolatie in woonhuismonumenten via metingen opgevolgd wordt en waarbij tevens nagegaan wordt in welke mate huidige hygrothermische modellen in staat zijn om dit gedrag te voorspellen. Een van de cases in het project is het landgoed de Grote Noordijk in Wilp (zie Figuur 1).



Figuur 1 Landgoed de Grote Noordijk in Wilp.

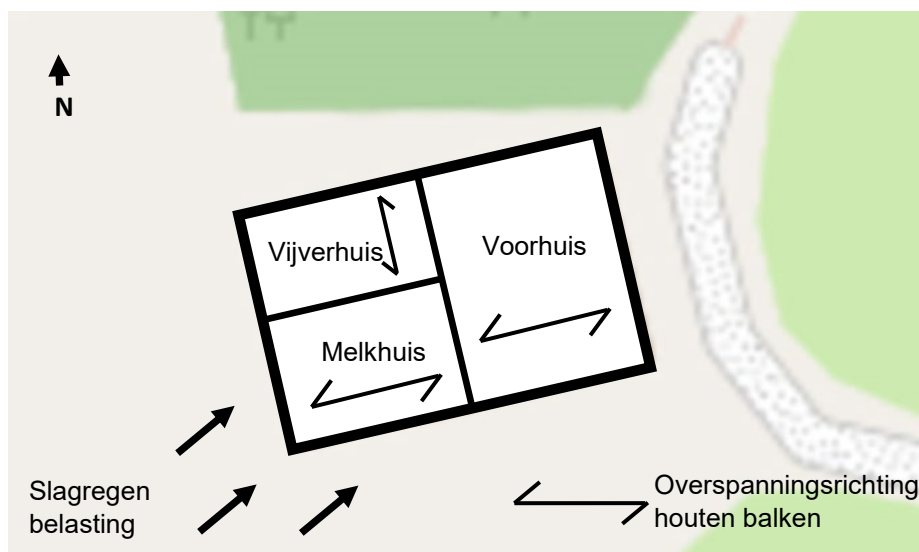
Grote Noordijk is een landgoed in de provincie Gelderland in Nederland. Eind 17^{de} eeuw stond op deze plek een boerderij die in de loop der eeuwen is uitgebreid tot een groot landgoed met een voornamen woning. Rond 1750 is de boerderij uitgebreid met een landheerkamer en in 1807 is de boerderij verbouwd tot een landhuis in neoclassicistische stijl (figuur 1). Sinds 1985 heeft het landhuis lange tijd 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. Tijdens deze renovatiefase zijn meetsensoren ingebouwd in de verschillende buitenwanden. Tevens zijn de materiaaleigenschappen van de belangrijkste materialen opgemeten, wat toelaat om de opgemeten prestaties te vergelijken met de resultaten van numerieke simulaties.

2.1 Binnenisolatie voor het landgoed de Grote Noordijk

De oorspronkelijk gevel bestond uit massief steens metselwerk met een dikte van ongeveer 21 cm. Deze was op verschillende plekken voorzien van een stuclaag 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 grotendeels 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 de fundering. Verder zijn er nieuwe regenpijpen aangebracht of gerepareerd waardoor deze niet meer tegen de gevel lozen maar direct op de vijver. Daarnaast zijn de voegen en openingen in de gevels gerepareerd, 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 geplaatst op een afstand van 3 cm van de bestaande gevel. De tussenruimte is opgevuld met losse kalkhennep vezels van vermalen blokken. De binnenzijde is voorzien van een pleister van 1 cm. Bij metingen in het lab van de KU Leuven bleek echter dat deze pleister over een dikte van ongeveer 0,5 cm in de blokken is getrokken waardoor de blokken een effectieve dikte hebben van 8,5 cm en de pleister van 1,5 cm.

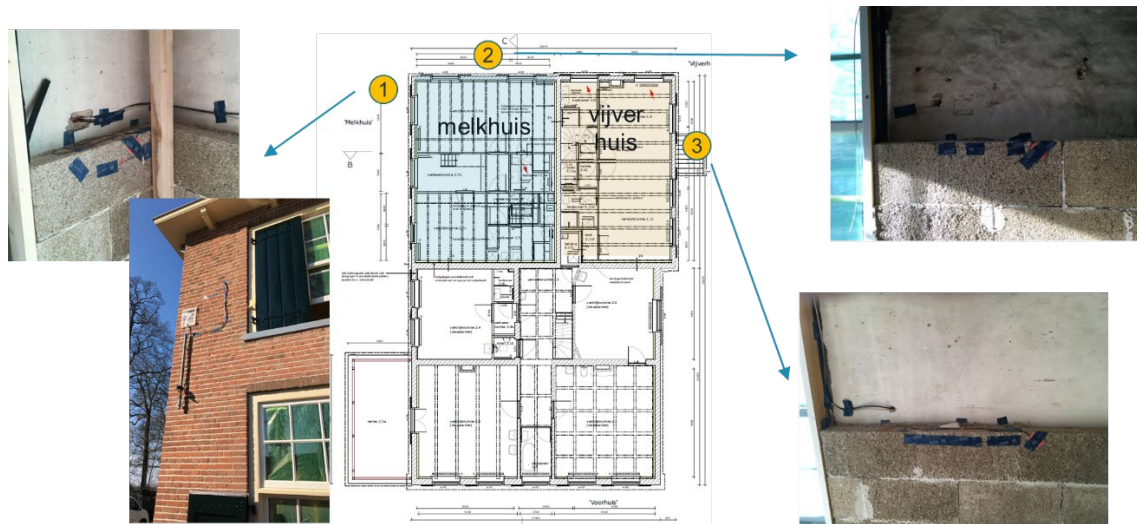
Op diverse plaatsen in het Melkhuis en Vijverhuis zijn houten balken opgelegd in de gevel. Figuur 2 toont de richting van de balklagen, de noordpijl en de richting van waaruit slagregen op de gevels staat. Met name de westgevel bij het Melkhuis heeft een combinatie van houten balkkoppen in de gevel en regen op de gevel. Bij het Vijverhuis zijn strijkbalen aanwezig nabij de westgevel en bij het Melkhuis nabij de zuidgevel. In beide gevallen in combinatie met een regenbelasting.



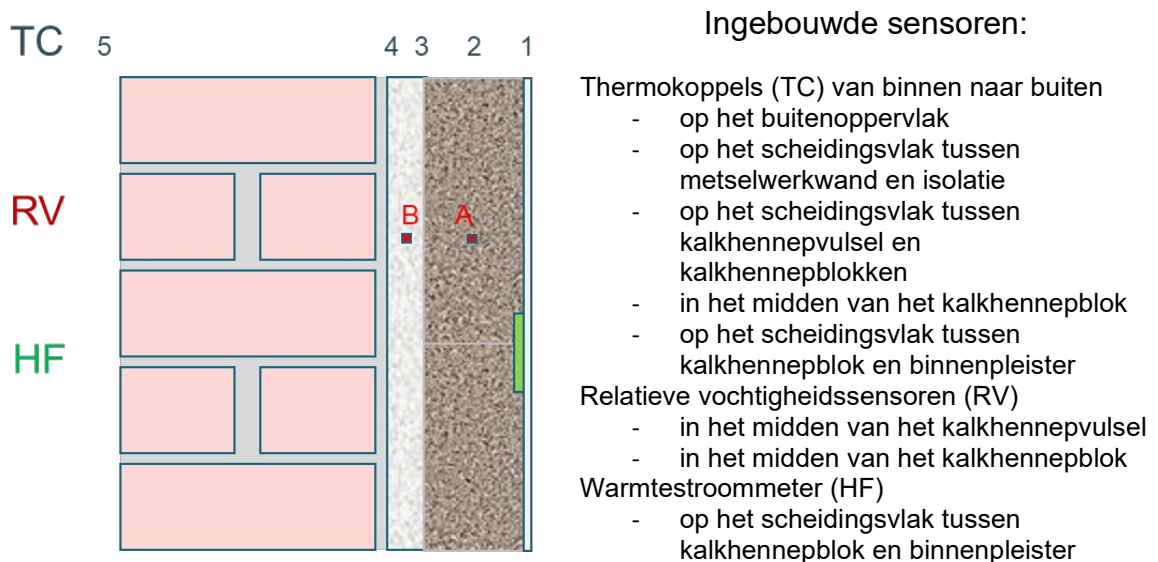
Figuur 2 schematische plattegrond van het landhuis Grote Noordijk in Wilp, met noordpijl, regen belaste gevels en overspanningsrichting houten balken.

2.2 Monitoring van de prestaties

Figuur 3 toont de beide achtergebouwen tijdens de renovatiefase. Tijdens deze fase zijn op 3 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 vochtigheid in het midden van de kalkhennepblokken en in het kalkhennepvulsel en de warmtestroom tussen kalkhennepblok en binnenpleister. Figuur 4 geeft een schematische voorstelling van de wand met de posities van de meetsensoren en de uitvoering ter plaatse tijdens constructie.



Figuur 3 Tijdens de renovatiefase werden op drie posities (1) zuidgevel, (2) westgevel en (3) noordgevel meetsensoren ingebouwd in de wanden om het hygrothermisch gedrag van de nageïsoleerde wanden op te volgen.



Figuur 4 Schematische voorstelling van de wand met de ingebouwde meetsensoren.

2.3 Hygrothermische modellering

Materiaaleigenschappen

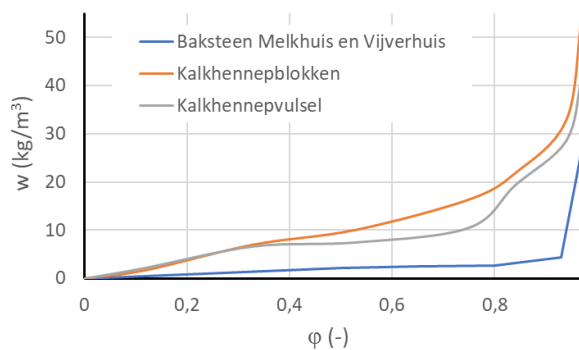
De hygrothermische eigenschappen van de bakstenen in de gevel van het Melkhuis en van de kalkhennepblokken en het kalkhennepvulsel zijn gekarakteriseerd in het laboratorium van de KU Leuven. Tabellen 1 en 2 geven een overzicht van de eigenschappen van de materialen. In het zwart zijn de in het lab gemeten eigenschappen. Niet alle materiaaleigenschappen zijn gekarakteriseerd. Dit betekent dat sommige eigenschappen ingeschat moeten worden. Deze inschatting is gedaan op basis van vergelijkbare materialen in de database van WUFI 2D of op basis van de productfiches van de gebruikte kalkhennep. Niet gemeten eigenschappen van het kalkhennepvulsel zijn gelijkgesteld aan die van de kalkhennepblokken. Deze ingeschatte eigenschappen zijn in de tabellen in het grijs weergegeven. Figuren 5 en 6 geven de hygroscopische curven en vochtretentiecurven. De sorptie-isothermen van de bakstenen zijn niet gemeten; hiervoor is een hygroscopische curve aangehouden van een standaard baksteen in de software WUFI 2D.

Tabel 1 Eigenschappen van de gevelmaterialen van het Melkhuis.

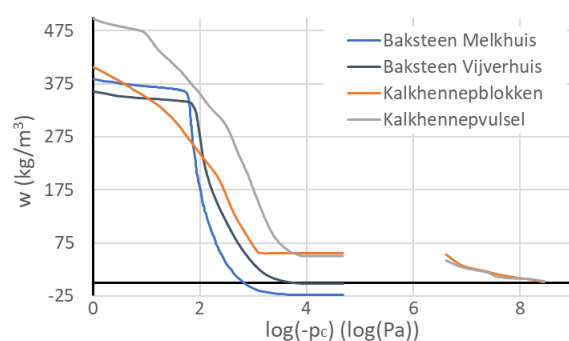
eigenschap	Baksteen Melkhuis	Kalkhennep blokken	Kalkhennep vulsel
Massadichtheid (kg/m ³)	1629,9	345	285
Open porositeit (%)	38,7	41	50
w _{sat} (kg/m ³)	386	410	500
Waterabsorptie (kg/m ² s ^{0,5})	0,355		
w _{cap} (kg/m ³)	262,1	177	177
Specifieke warmte (J/kgK)	850	1560	1560
μ (-)	5	30% RV: 3,7 90% RV: 3,3	30% RV: 3,7 90% RV: 3,3

Tabel 2 Warmtegeleidingscoëfficiënt (W/(m·K)) van de gevelmaterialen van het Melkhuis.

T (°C)	Baksteen Melkhuis	Kalkhennep blokken	Kalkhennep vulsel
-0,1 (droog)	0,564		
9,9 (droog)	0,578	0,0782	0,0663
19,9 (droog)	0,590	0,0812	0,0695
29,9 (droog)	0,597	0,0841	0,0723
39,9 (droog)	0,602		
9,9 (nat @97% RV)		0,1251	0,1132
19,9 (nat @97% RV)		0,1292	
29,9 (nat @97% RV)		0,1346	



Figuur 5 hygroscopische curven



Figuur 6 vochtretentiecurven

Voorts is voor de bakstenen aangehouden dat de warmtegeleidingscoëfficiënt als functie van de hoeveelheid vocht toeneemt met 15% per massa% water, gelijk aan standaardbakstenen uit WUFI 2D. De transportcoëfficiënten voor watertransport door capillaire zuiging voor de bakstenen zijn ingeschat op basis van de waterabsorptie en het verzadigingsvochtgehalte; en van de kalkhennepblokken en -vulsel op basis van een kalkhennepmateriaal in de database van WUFI 2D. Het waterdampdiffusieweerstandsgetal, μ , voor de pleisterlaag is uit metingen afgeleid op 17,3 bij 33% RV en 11,8 bij 90% RV. De overige eigenschappen van de pleisterlaag zijn overgenomen van de productfiche of van een andere pleisterlaag in de software WUFI 2D.

Randvoorwaarden en begincondities

Voor de hygrothermische simulaties is zowel WUFI 2D (door TU Delft) als Delphin (door KU Leuven) gebruikt. In dit artikel zullen alleen de resultaten van de simulaties met WUFI 2D worden getoond, en alleen voor de zuidgevel van het Melkhuis (met slagregenbelasting). Er is uitgegaan van een 1-dimensionale situatie.

Voor de buitencondities zijn twee situaties aangehouden:

- Vergelijking tussen metingen en simulaties: Weerdata gemeten door het KNMI weerstation Deelen in de periode van de meetcampagne is als buitenconditie gebruikt. Dit weerstation bevindt zich op een afstand van 24 km hemelsbreed van Grote Noordijk. De regenbelasting op de gevels is gemodelleerd op basis van de volgende vergelijking: $\text{Regen} \cdot (R1 + R2 \cdot \text{windsnelheid})$ met $R1=0$ en $R2=0,12$ s/m (ingeschat op basis van slagregenmeetresultaten). Voor de opnamefactor van slagregen door de muur is 0,7 aangehouden (standaard gevel).
- Lange termijn simulaties (TMY): Voor lange termijn simulaties is het TMY (2007-2021) van het weerstation Deelen gebruikt met een representatief klimaatjaar van de website climate.onebuilding.org. De regenbelasting is gemodelleerd op dezelfde wijze als hiervoor maar met $R2=0,07$ (referentiesituatie in het midden van een grote gevel).

Voor het metselwerk is uitgegaan van een standaard warmteoverdrachtscoëfficiënt van $25 \text{ W/m}^2\text{K}$, een emissiviteit voor langgolvlige straling van 0,94 en een absorptiecoëfficiënt voor kortgolvlige straling van 0,68. De overdrachtscoëfficiënt voor vochttransport aan het oppervlakte is bepaald op basis van de Lewis correlatie.

Voor de binnencondities zijn diverse omstandigheden gesimuleerd.

- Vergelijking tussen metingen en simulaties: Voor de binnentemperatuur zijn de meetdata aangehouden van de thermokoppel op het binnenoppervlak. Vanwege een overgangswaerstand tussen oppervlakte en lucht zullen deze waarden niet volledig overeenkomen met de werkelijke binnentemperatuur maar daar wel in de buurt van liggen. De absolute luchtvochtigheid binnen is als volgt bepaald: partiële waterdampspanning binnen = partiële waterdampspanning buiten + 300 Pa. Gedurende de meetcampagne was de woning nog niet bewoond en werd er goed geventileerd waardoor er binnen geen tot nauwelijks vochtproductie was. Er was echter wel enig bouwvocht aanwezig.
- Lange termijn simulaties (TMY): Voor de binnentemperatuur is aangehouden dat deze gelijk is aan 20°C zolang de buitentemperatuur lager is dan 10°C en gelijk is aan 25°C voor een buitentemperatuur hoger dan 20°C . Daar tussenin wordt lineair geïnterpoleerd. De absolute luchtvochtigheid binnen is bepaald voor verschillende condities: partiële waterdampspanning buiten + Δp_i , waarin Δp_i 0 of 400 Pa is.

Als warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de binnenzijde is $7,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ aangehouden en voor de overdrachtscoëfficiënt voor vochttransport wederom de Lewis correlatie.

De initiële temperatuur en luchtvochtigheid die aangehouden zijn, zijn weergegeven in tabel 3. Deze zijn ingeschat op basis van de gemeten temperaturen en luchtvochtigheden in het materiaal.

Tabel 3 *Begincondities simulaties Melkhuis zuidoostgevel voor vergelijking met metingen (1 aug. 2022).*

variabele	Baksteen	Kalkhennep vulsel	Kalkhennep blokken	pleisterlaag
Temperatuur (°C)	20	20	20	20
RV (%)	90	90	95	95

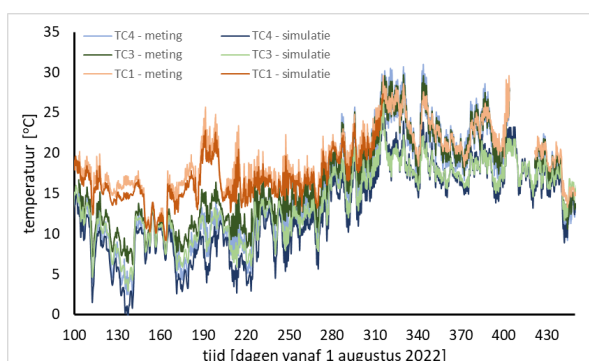
Tabel 4 *Begincondities simulaties Melkhuis zuidoostgevel voor TMY simulaties (1 januari).*

variabele	Baksteen	Kalkhennep vulsel	Kalkhennep blokken	pleisterlaag
Temperatuur (°C)	3	8	15	20
RV (%)	90	85	55	50

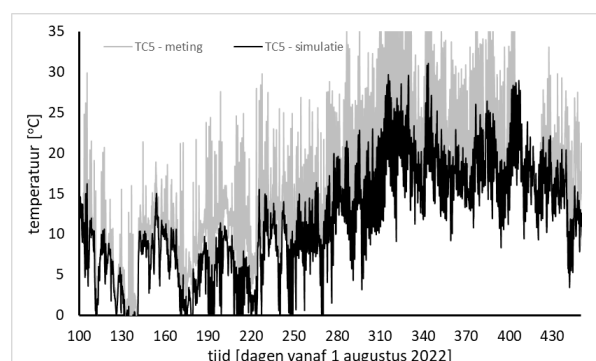
Vergelijking tussen simulatie- en meetresultaten en de uitdagingen bij de modellering

De metingen aan de gevel zijn gestart op 11 november 2022. Omdat tijdens de eerste drie a vier maanden de resultaten van de simulaties nog sterk beïnvloed worden door de gekozen begincondities, zijn de simulaties gestart per 1 augustus 2022. Figuur 7 laat een vergelijking zien van de gemeten en gesimuleerde temperaturen op de punten 1, 3, 4 en 5 (zie figuur 4). Figuur 8 toont een vergelijking van de gemeten en gesimuleerde relatieve vochtigheid van de meetpunten A (midden kalkhennepvulsel) en B (midden kalkhennepblokken) (zie fig. 4).

Zoals te zien komen de gemeten en gesimuleerde temperaturen aan de binnenzijde van de gevel redelijk goed met elkaar overeen (TC1, 3 en 4). Dit komt omdat voor de ruimtetemperatuur in het simulatiemodel de gemeten oppervlaktetemperatuur gehanteerd is. De afwijking aan de buitenzijde van de gevel is groter (TC5). Deze afwijking wordt voor een belangrijk deel veroorzaakt door het verschil in lokale weersomstandigheden ter plekke van de gevel en de weersomstandigheden zoals gemeten door het meest nabij weerstation. Daarnaast bevindt de thermokoppel zich op het oppervlakte van het metselwerk terwijl de simulatiereultaten de eerste paar mm van de baksteen betreffen.

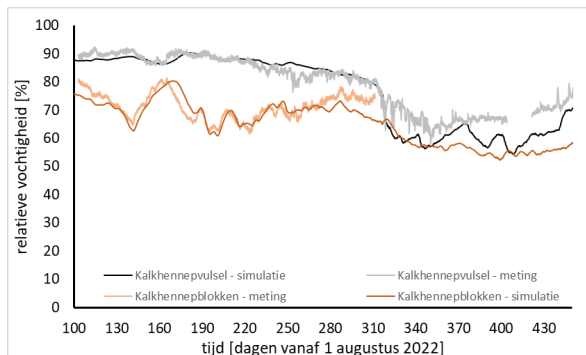


Figuur 7 (links) *Gemeten en gesimuleerde temperaturen ter plekke van de thermokoppels 1, 3 en 4, zuidoostgevel Melkhuis.*



Figuur 7 (rechts) *Gemeten en gesimuleerde temperaturen ter plekke van de thermokoppel 5, zuidoostgevel Melkhuis (tijdstap 90 s; aantal elementen x-richting: 40).*

Ook de gesimuleerde relatieve vochtigheden in de kalkhennep volgen redelijk goed de trend van de metingen. Het verschil bij de kalkhennepblokken tegen het einde van de simulatie- en meetperiode is mogelijk een gevolg van het bewoond raken van het pand waardoor de daadwerkelijke vochtproductie binnen hoger is dan gesimuleerd.



Figuur 8 *Gemeten en gesimuleerd RV ter plekke van de vochtsensoren, zuidgevel Melkhuis (timestep 90 s; aantal elementen x-richting: 40).*

Een van de uitdagingen voor een simulatie die voldoende overeenkomt met de meetwaarden is het bepalen van de materiaaleigenschappen. Binnen dit onderzoeksproject konden veel materiaaleigenschappen worden gemeten in het laboratorium. Toch konden niet alle benodigde materiaaleigenschappen worden gemeten en moesten verschillende aannames worden gedaan. Voor hygrothermische modellering zijn veel materiaaleigenschappen vereist. En zeker voor een praktijkcasus is het vaak niet mogelijk om al deze materiaaleigenschappen te bepalen op basis van metingen in het lab. Dit leidt onherroepelijk tot het introduceren van een simulatie-onzekerheid.

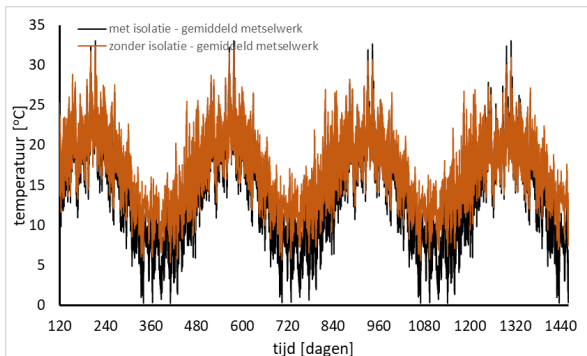
Een tweede uitdaging die optreedt bij het vergelijken van simulatieresultaten en meetresultaten is het bepalen van de juiste begincondities (temperatuur en vochtigheid in de materialen). Omdat vochttransport, zeker dampdiffusie, een traag proces is, hebben deze startcondities gedurende lange tijd (drie a vier maanden) invloed op de simulatieresultaten. Om een goed inzicht te krijgen in lange termijn effecten worden veelal simulaties over meerdere jaren uitgevoerd om minder last te hebben van deze begincondities en om inzicht te hebben in het toe- of afnemen van vocht in de materialen over langere termijn.

Een derde uitdaging betreft het bepalen van de buiten- en binnencondities die als randvoorwaarden worden gebruikt in de simulaties. De beste optie hiervoor zijn metingen direct bij het object. Maar veelal zal gebruik gemaakt worden van het meest nabije weerstation van een meteo-instituut. Ook hierdoor zal er een onzekerheid in de resultaten optreden omdat er een verschil zit tussen het klimaat bij het meetstation en het lokale microklimaat (temperatuur, luchtvochtigheid, zonnestraling, windsnelheid- en richting, slagregenbelasting,...). Dit geldt ook bij het gebruik van referentieklimaatjaren. Tevens zijn deze gemeten waarden historische waarden die niet overeen zullen komen met het microklimaat rondom het gebouw in de toekomst.

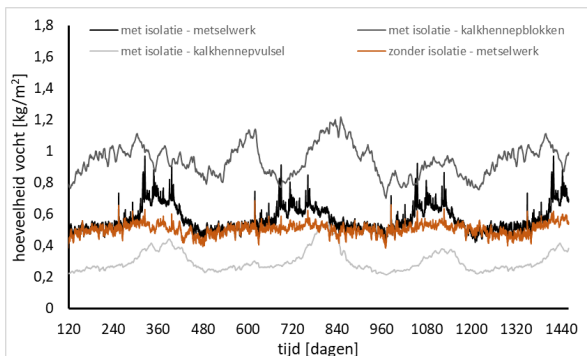
Een probabilistische benadering van de simulatie kan helpen om een betere risico-inschatting te maken van het aanbrengen van isolatie aan de binnenzijde van de gevel. Dit zal in paragraaf 3 nader worden uiteengezet.

Gevolgen van het aanbrengen van binnenisolatie (op basis van TMY; droge binnencondities)

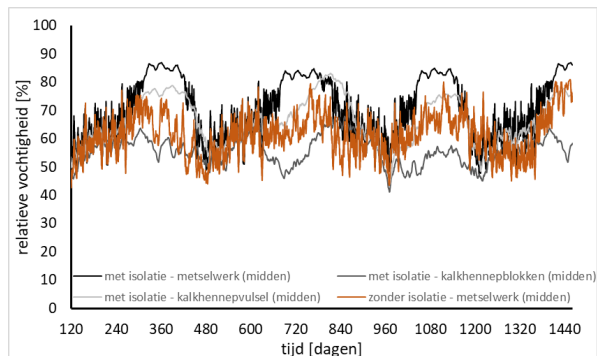
Om de invloed van het aanbrengen van binnenisolatie te simuleren is zowel de gevel met als zonder binnenisolatie gesimuleerd voor een periode van 4 jaar. De stuclaag/pleisterlaag is in beide situaties wel aanwezig. Voor de buitencondities is het TMY 2007-2021 van weerstation Deelen aangehouden. Voor de binnencondities zijn droge condities aangehouden (partiële waterdampspanning binnen = partiële waterdampspanning buiten). Figuren 9, 10 en 11 tonen de temperaturen en hoeveelheden vocht in de materialen voor beide situaties. De eerste 120 dagen worden niet getoond omdat die dagen beïnvloed zijn door de begincondities.



Figuur 9 *Gesimuleerde temperaturen op de grensvlakken van de materialen, zuidgevel Melkhuys (tijdstap 300 s; aantal elementen x-richting: 60 “met isolatie” en 30 “zonder isolatie”).*



Figuur 10 (links) *Gesimuleerde hoeveelheid vocht in de materialen (kg/m²), zuidgevel Melkhuys.*

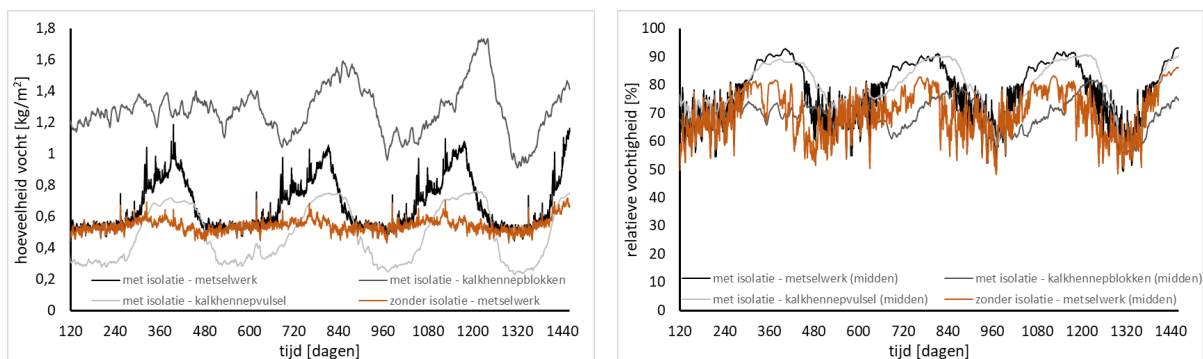


Figuur 11 (rechts) *Gesimuleerde RV in het midden van de materialen, zuidgevel Melkhuys (tijdstap 300 s; aantal elementen x-richting: 60 “met isolatie” en 30 “zonder isolatie”).*

Zoals te zien in figuren 10 en 11 nemen de totale hoeveelheid vocht en relatieve vochtigheid in het metselwerk toe als gevolg van na-isolatie aan de binnenzijde van de gevel, met name in de wintermaanden. Door de aanwezigheid van het isolatiemateriaal wordt het drogingsproces bemoeilijkt, ook al wordt een dampopen capillair actief isolatiemateriaal zoals kalkhennep gebruikt. Ook de temperatuur van het metselwerk wordt lager als gevolg van de isolatie aan de binnenkant (zie figuur 9). In de zomermaanden liggen de hoeveelheden vocht in het metselwerk en de temperatuur van het metselwerk bij beide gevelopbouw dicht bij elkaar. Bij droge binnencondities lijkt zich een stabiele (fluctuerende) situatie te ontwikkelen omtrent de hoeveelheid vocht in de gevel.

Gevolgen van het aanbrengen van binnenisolatie (op basis van TMY; vochtigere binnencondities)

In een vervolgstap is gekeken wat de invloed is van vochtigere binnencondities. Voor de buitencondities is wederom het TMY 2007-2021 van weerstation Deelen aangehouden. Voor de binnencondities zijn gematigd vochtige condities aangehouden (partiële waterdampspanning binnen = partiële waterdampspanning buiten + 400 Pa). Een toename van 400 Pa komt ongeveer overeen met de toename van de hoeveelheid vocht in (grotere) woningen in de wintermaanden bij een buitentemperatuur van ongeveer 5 °C [2]. Figuren 12 en 13 tonen de hoeveelheden vocht en relatieve vochtigheid in de materialen voor de situaties met en zonder aangebrachte binnenisolatie.



Figuur 12 (links) Gesimuleerde hoeveelheid vocht in de materialen (kg/m²), zuidgevel Melkhuis.

Figuur 13 (rechts) Gesimuleerde RV in het midden van de materialen, zuidgevel Melkhuis (tijdstep 300 s; aantal elementen x-richting: 60 “met isolatie” en 30 “zonder isolatie”).

Een vergelijking tussen figuren 12 en 10, en 13 en 11 toont dat bij vochtigere binnencondities ook de hoeveelheid vocht in de gevel toeneemt, en wel het sterkst voor de kalkhennepisolatie. Het aanbrengen van binnenisolatie laat ook de hoeveelheid vocht in het metselwerk verder toenemen. Net als bij de drogere binnencondities, is ook hier de sterkste toename te zien in de wintermaanden. Ook bij deze vochtigere condities lijkt zich op termijn een relatief stabiele (fluctuerende) situatie te ontwikkelen omtrent de hoeveelheid vocht in de gevel.

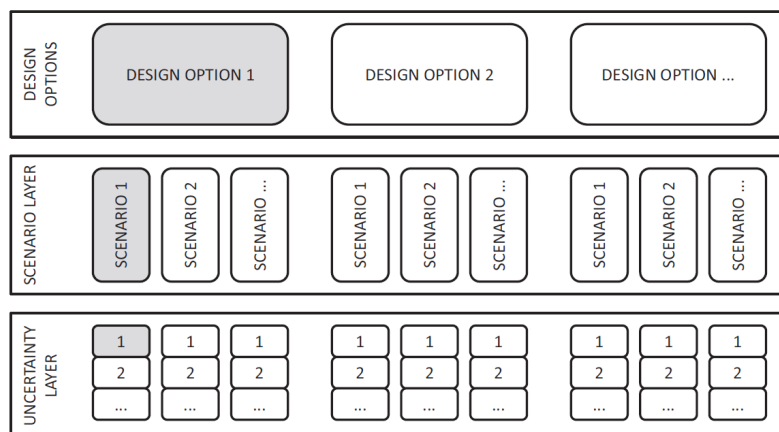
In de paragraaf 3 zal nader ingegaan worden op de risico's van vorstschade en schimmelgroei bij toepassing van diverse typen binnenisolatie, incl. capillair actief isolatiemateriaal.

3 Omgaan met onzekerheden

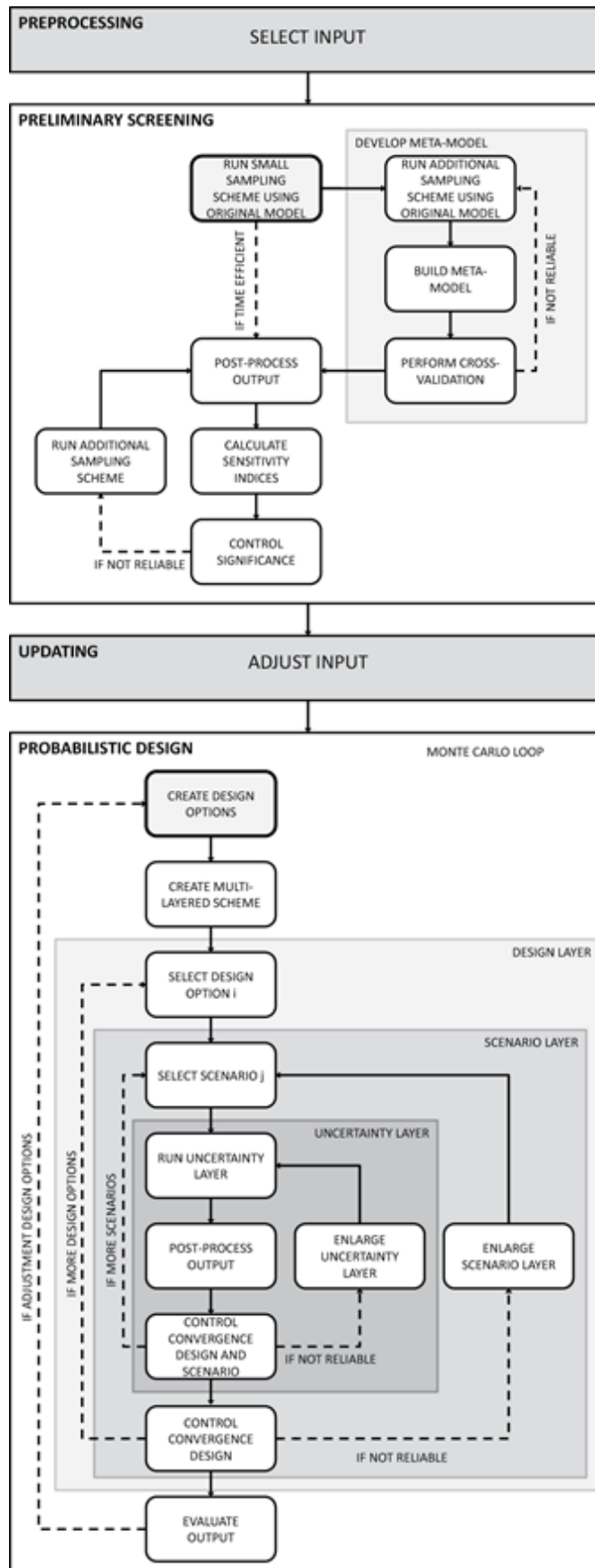
De analyse in het vorige deel over de toepassing van binnenisolatie in het landgoed de Grote Noordijk toont dat zelfs in een zorgvuldig gedocumenteerde case heel wat onzekerheden blijven die de uitkomst van de hygrothermische simulaties aanzienlijk kunnen beïnvloeden. In een vroege ontwerpfase is het aantal onzekere parameters vaak nog veel groter, wat de toepassing van hygrothermische simulaties voor het ontwerp en de keuze van een binnenisolatiesysteem in de praktijk niet eenvoudig maakt. Een deterministische benadering kan immers leiden tot een twijfelachtige optimalisatie en een ver van optimaal ontwerp. In dit deel gaan we na hoe we via een probabilistische benadering met deze onzekerheden kunnen omgaan om toch met vertrouwen een binnenisolatiesysteem te kiezen dat de gewenste energiebesparing oplevert zonder mogelijke risico's op schade over het hoofd te zien.

3.1 Globaal kader voor een probabilistische benadering

In een probabilistische analyse zal via onzekerheidskwantificatie en sensitiviteitsanalyse nagegaan worden hoe variaties en onzekerheden in inputparameters aanleiding geven tot variatie op de voorspelde output. Dit gebeurt meestal via Monte-Carlo-simulaties. Om op een betrouwbare manier alle onzekerheden mee te nemen moet onderscheid gemaakt worden tussen de verschillende soorten onzekerheden. Enerzijds heeft men de ontwerp mogelijkheden (het type isolatiesysteem, de dikte van het isolatiepakket,...) die vrij gekozen kunnen worden. Anderzijds heeft men echte onzekerheden, zoals daar zijn: de juiste opbouw van de wand, de gebruikte materialen en hun eigenschappen of ook het toekomstige binnen- en buitenklimaat. Zeker met het oog op de klimaatsverandering die ons te wachten staat, is het belangrijk om ook daar te kijken of elke oplossing die we voorschrijven even robuust is voor mogelijk toekomstige klimaatscenario's. De onzekerheden kunnen dan ook onderverdeeld worden in drie lagen (zie figuur 14): de *ontwerpopties*, die we zelf in de hand hebben; *de toekomstige scenario's*, het te verwachten binnen- en buitenklimaat en *de onzekerheden* (materiaaleigenschappen, blootstellingsgraad aan slagregen,...). Zoals in Figuur 14 te zien, resulteert deze onderverdeling in een gelaagd samplingschema. Alle ontwerpopties worden op die manier aan dezelfde toekomstige scenario's blootgesteld en per scenario worden alle onzekerheden meegenomen. Deze manier van probabilistisch modelleren voorgesteld in Van Gelder e.a. [3] zorgt ervoor dat alle ontwerpopties aan dezelfde onzekerheden onderworpen zijn en er dus een betrouwbare vergelijking van de verschillende mogelijke binnenisolatie-oplossingen kan gemaakt worden. Nadeel is dat dit snel aanleiding geeft tot een grote hoeveelheid simulaties. Daarom worden binnen probabilistische analyses de originele HAM-modellen soms vervangen door zogenaamde metamodellen. Een voorbeeld daarvan is het gebruik van getrainde zeer snelle neurale netwerken ter vervanging van de originele Delphin-simulaties voor de voorspelling van het hygrothermisch gedrag van massief metselwerk of houtskeletbouwwanden in het werk van Tijskens [4]. Het globale schema van de probabilistische methodologie ziet er dan uit zoals weergegeven in Figuur 15.



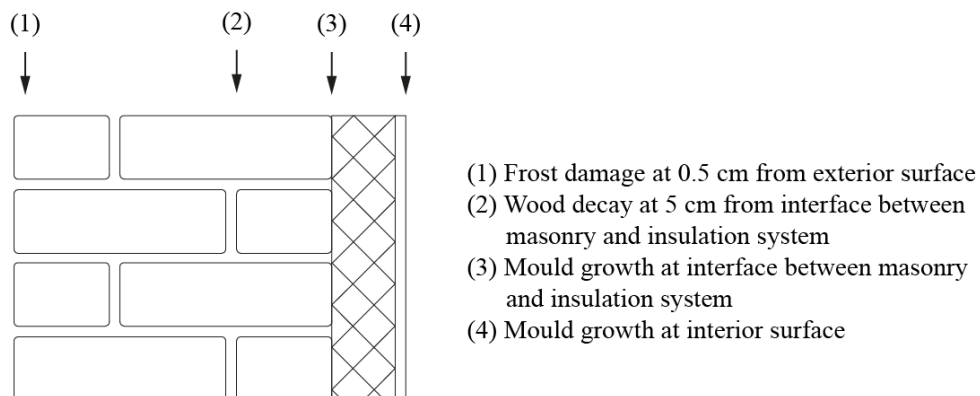
Figuur 14 Voorbeeld van een gelaagd samplingschema om de verschillende soorten onzekerheden gestructureerd mee te nemen, zodat elke voorgestelde ontwerpoplossing aan dezelfde parameters wordt blootgesteld. De eerste Monte-Carlorun is aangeduid via de grijsgekleurde vakjes. Figuur overgenomen uit Van Gelder e.a. [3].



Figuur 15 Organisatieschema van de globale probabilistische methodologie. Figuur overgenomen uit Van Gelder e.a. [3].

3.2 Toepassing voor de evaluatie van het risico op schade bij dampopen en dampdichte isolatiesystemen

In dit deel tonen we hoe de probabilistische methodologie beschreven in de vorige sectie kan toegepast worden voor het evalueren van verschillende mogelijke oplossingen voor de na-isolatie van historische woongebouwen. We beperken ons hier tot een 1D-case studie van binnenisolatie op een historische metselwerkwand zoals uitgewerkt binnen het kader van het Europese RiBuild-project [5]. Figuur 16 geeft de wand met mogelijke binnenisolatie schematisch weer, samen met de geëvalueerde schadefenomenen. Verschillende wanddiktes van de originele wand zijn beschouwd, net als verschillende binnen- en buitenklimaten. Vier mogelijke isolatiesystemen zijn met elkaar vergeleken: 1) geëxtrudeerd polystyreen (XPS), 2-3) minerale wol met constant en variabel dampscherm en 4) calciumsilicaat gekleefd op de oorspronkelijke wand met een 4 mm dikke kleefmortel. De binnenafwerking bestaat uit een gipskartonplaat (10 mm), behalve voor de calciumsilicaattoepassing, waar een 10 mm dikke binnenpleister voorzien is. Voor elk isolatiesysteem zijn 8 isolatiediktes vergeleken: 1, 2, 4, 6, 10, 15, 20 en 30 cm. In totaal zijn dus 33 ontwerp oplossingen met elkaar vergeleken (de ongeïsoleerde wand en de wand geïsoleerd met 4 types isolatiesystemen en dit op 8 mogelijke diktes). De gesimuleerde periode bedraagt 3 jaar en 4 maanden. De eerste 4 maanden worden aangezien als inlooperperiode en zijn niet beschouwd. De temperatuur en relatieve vochtigheid gesimuleerd op de verschillende posities weergegeven in Figuur 16 zijn gebruikt om het risico op schade te voorspellen overeenkomstig de schademodelden weergegeven in Tabel 5. Daarnaast is ook de warmtestroom door de wand gedurende het laatste jaar als output meegenomen.



Figuur 16 Verticale snede van de 1D-wandopbouw met aanduiding van de posities waar mogelijke schade geëvalueerd wordt. Overgenomen uit het RiBuild-eindrapport [5].

Tabel 5 Toegepaste schadevoorspellingsmodellen en de vereiste hygrothermische output.

Schade patroon	Voorspellingsmodel	Benodigde output
Vorstschade	Aantal natte vorst-dooi cycli	T, RV, saturatiegraad
Houtrot van ingewerkte balkkoppen	VTT houtrotmodel	T, RV
schimmelgroei	Vernieuwde VTT schimmelgroeimodel	T, RV

Voor alle parameters waarvan verwacht wordt dat ze het hygrothermisch gedrag van de (geïsoleerde) wand zullen beïnvloeden worden onzekerheden meegenomen. Tabel 6 toont de verschillende parameters en hun aangenomen spreiding. Meer details zijn terug te vinden in het RiBuild-eindrapport [5]. Ook variatie in de oorspronkelijk wand is meegenomen: drie verschillende baksteentypes (zie voor de eigenschappen Tabel 7) zijn beschouwd, elk op variabele diktes tussen de 15 en 50 cm.

Tabel 6 Probabilistische input parameters en hun verdeling.

Input parameter	Input verdeling
<i>Klimaatcondities</i>	
Meteorologische klimaatdata	D(Essen, Bremerhaven, Munich)
Convectieve warmteovergangscoefficiënt h_{conv} [W/m ² K]	Essen N(7.34, 2.11) Bremerhaven N(11.67, 3.17) Munich N(7.22, 1.77)
Convectieve vochtovergangscoefficiënt β [s/m]	$7.7 \cdot 10^{-9} h_{conv}$
<i>Conditie van de buitengevel</i>	
Gevelorientatie [graden tov noord]	U(0, 360)
Kortgolvrige absorptiecoëfficiënt	U(0.4, 0.8)
Blootstellingsfactor slagregen	U(0, 1.5)
<i>Opbouw gevel</i>	
Dikte [m]	U(0.15, 0.5)
Materiaal	D(Brick 1, Brick 2, Brick 3)

Toegepaste symbolen: U(a, b): uniforme verdeling tussen a and b; D(a, b): discrete verdeling met opties a en b; N(μ , σ): normale verdeling met gemiddelde waarde μ and standard deviatie σ

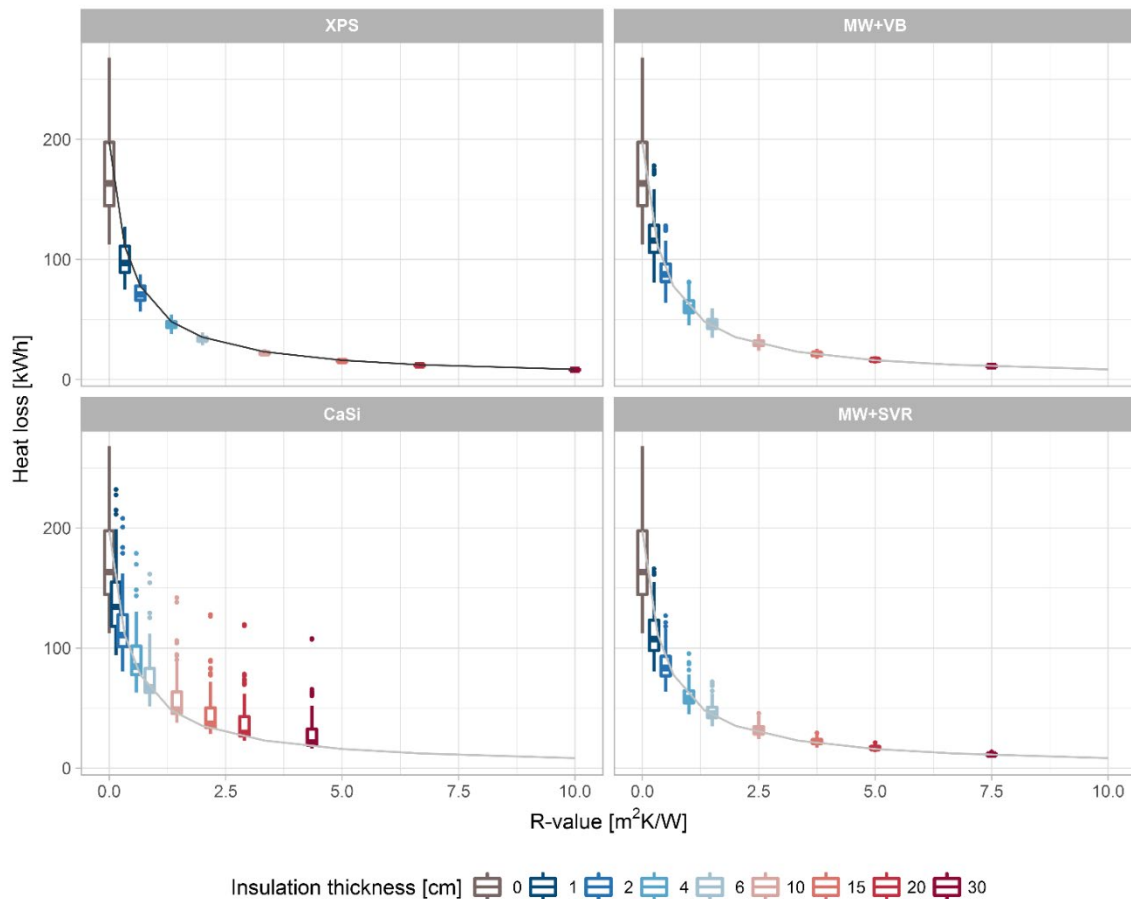
Tabel 7 Baksteeneigenschappen.

Materiaaleigenschap	Baksteen 1	Baksteen 2	Baksteen 3
Capillaire absorptie coëff. [kg/m ² s ^{0.5}]	0.125	0.46	0.04
Massadichtheid [kg/m ³]	2087	1786	1080
Thermische capaciteit [J/kgK]	870	1000	834
Warmtegeleidingscoëff. (droog) λ_{dry} [W/mK]*	0.9	1.08	0.996
Dampweerstand (dry cup) μ [-]	24.8	14.3	45.1
Capillair vochtgehalte [kg/m ³]	130	206.7	101
Saturatie vochtgehalte [kg/m ³]	209	323	253

* Vochtafhankelijke warmtegeleidingscoëfficiënt: $\lambda(w) = \lambda_{dry} + 0.56 \cdot w$ met w vochtgehalte in m³/m³

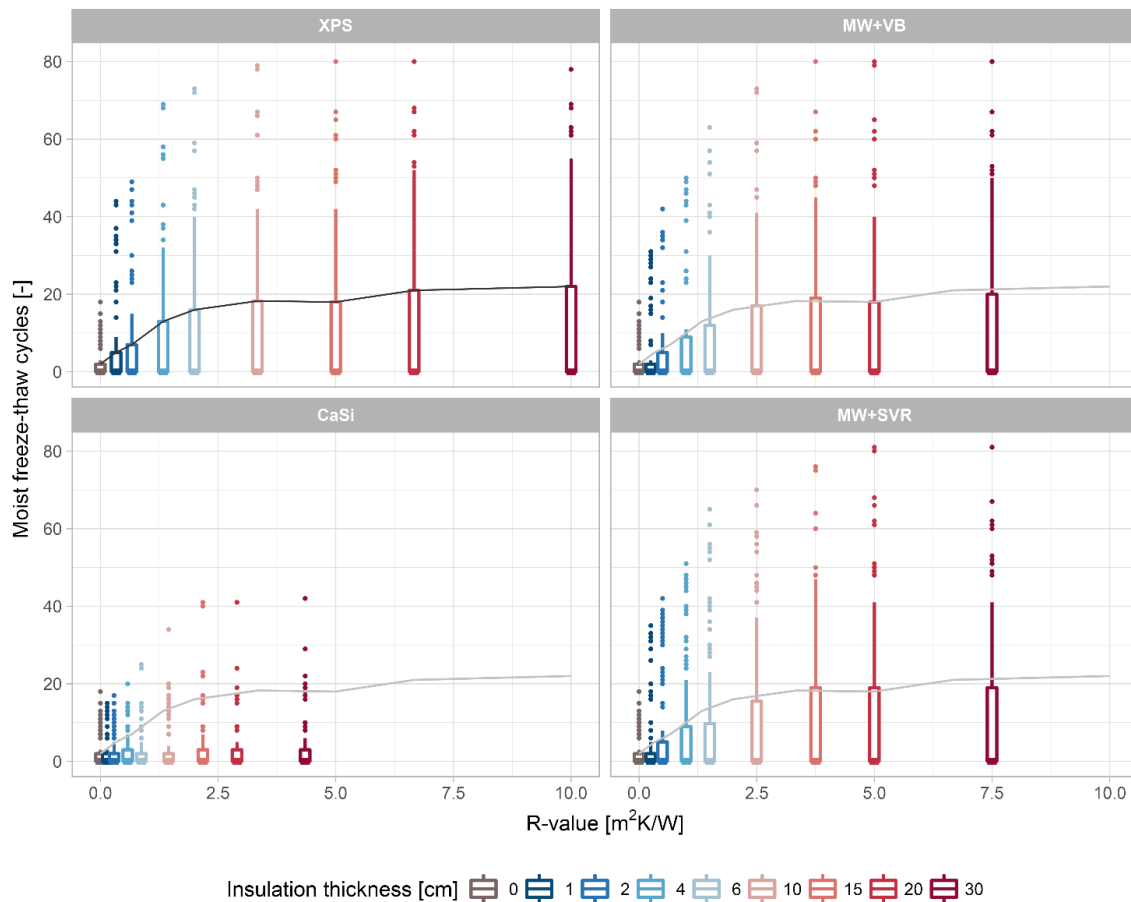
Om de prestaties van de verschillende isolatiesystemen met elkaar te vergelijken maken we gebruik van boxplots. Een boxplot geeft grafisch de verdeling van de output weer via rechthoeken die de mediaan en kwartielen aanduiden. 0 en 100% waarden worden weergegeven via een verticale lijn, waarbij uitschieters als punten worden voorgesteld.

Verbetering van de energetische prestaties: Figuur 17 toont het totaal warmteverlies gedurende het stookseizoen van het derde jaar voor de verschillende oplossingen als functie van de (droge) thermische weerstand van het toegepaste isolatiesysteem. Omwille van de hogere warmtegeleidingscoëfficiënt vertoont het dampopen isolatiesysteem (calciumsilicaat) een lagere warmteverstand dan de andere isolatiesystemen voor dezelfde dikte. Bovendien is ook de spreiding in het totale warmteverlies veel groter voor de wanden geïsoleerd met calciumsilicaat dan voor de andere wanden en is er meer kans op uitschieters. Beide resultaten kunnen verklaard worden door de kans op vochtaccumulatie in het dampopen en capillair actieve isolatiesysteem. Het belangrijkste besluit aangaande energetische prestaties is dan ook dat de dampdichte systemen meer robuust en beter voorspelbaar blijken te zijn. Bovendien neemt voor alle systemen de spreiding af met toenemende dikte. Bemerkt ook dat een thermische weerstand hoger dan ongeveer 4 m²K/W niet erg zinvol is omdat het nog nauwelijks de energetische prestaties verbetert, maar wel extra binnenruimte in beslag zal nemen.



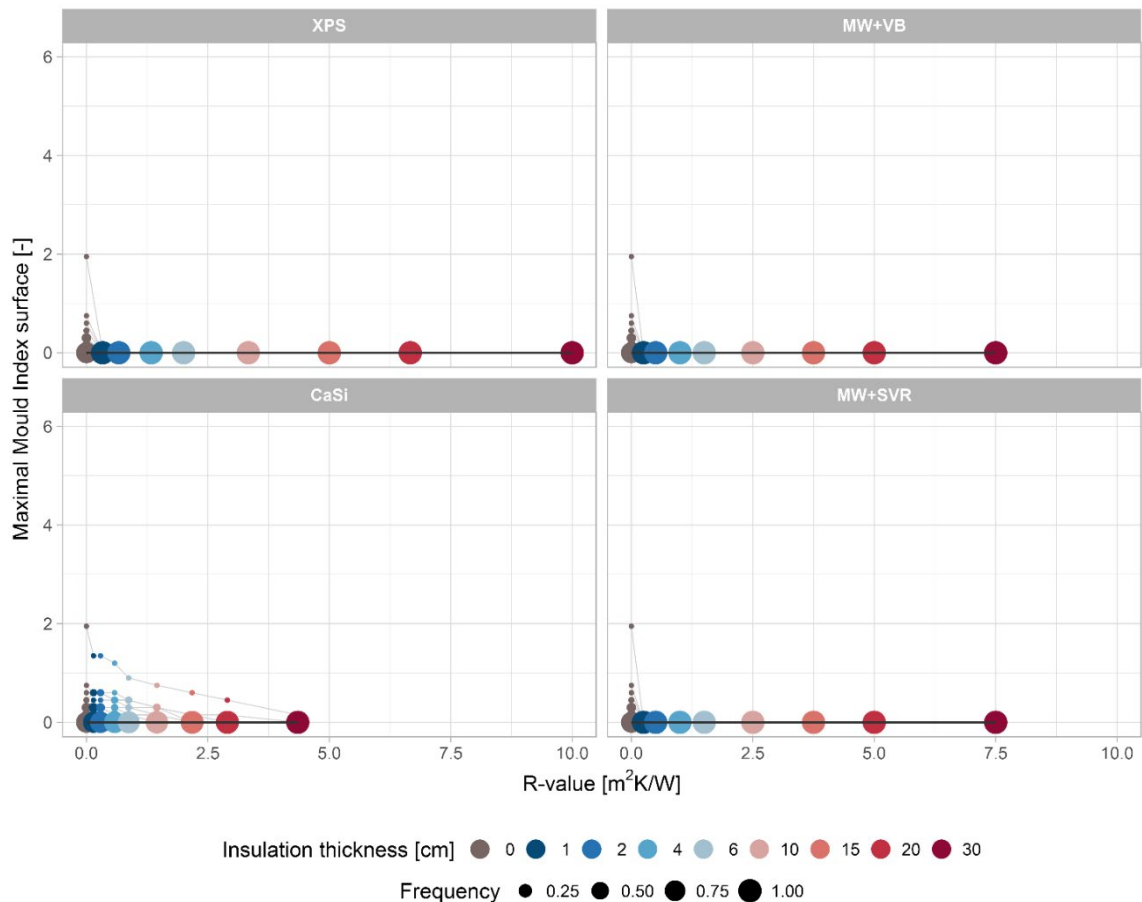
Figuur 17 Boxplots van het totale warmteverlies gedurende het laatste stookseizoen als functie van de (droge) thermische weerstand van het toegepaste isolatiesysteem. De ongeïsoleerde wand is telkens als referentie toegevoegd in grijs ($R=0 \text{ m}^2\text{K/W}$). De 75-percentiel lijn voor XPS is weergegeven met de zwarte lijn op de figuur linksboven en herhaald ter vergelijking als grijze lijn in de drie andere figuren. Figuur overgenomen uit het RiBuild-eindrapport [5].

Het risico op vorstschade is geëvalueerd op basis van het aantal natte vorst-dooi cycli. Nat is daarbij gedefinieerd als een vochtgehalte hoger dan 25% van het verzadigingsvochtgehalte. Zoals duidelijk te zien op figuur 18 vertonen alle wanden met een dampdicht binnenisolatiesysteem een veel groter aantal natte vorst-dooicycli dan de ongeïsoleerde wand en dit reeds voor heel dunne isolatiepakketten. Bij toenemende dikte wordt het fenomeen alleen maar erger. Voor het dampopen isolatiesysteem is deze stijging veel minder zichtbaar. Merk echter op dat de figuur enigszins misleidend overkomt, omdat voor alle isolatiesystemen de mediaan nog altijd overeenkomt met nul natte vorst-dooicycli.



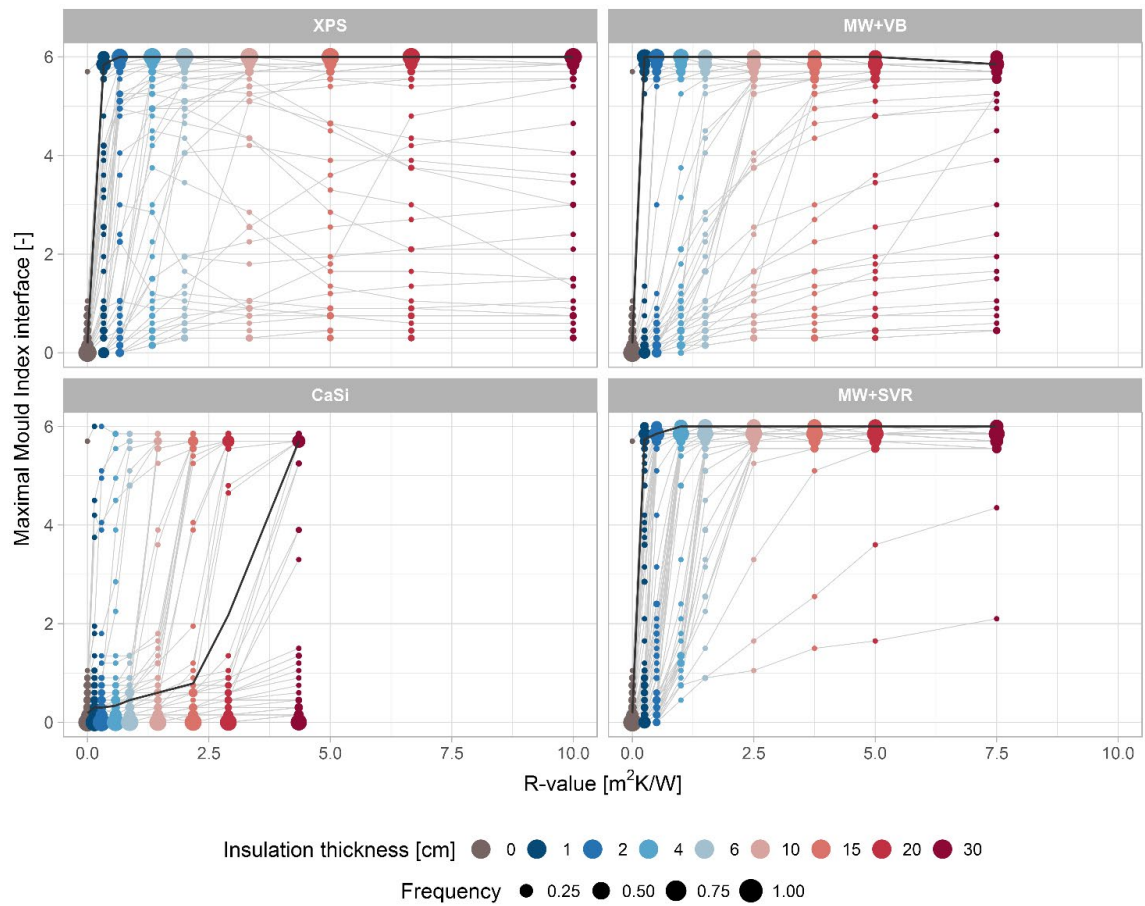
Figuur 18 *Boxplots van het aantal natte vorst-dooicycli ($w > 0.25 \cdot w_{sat}$) gedurende het laatste jaar uitgezet als functie van de (droge) thermische weerstand van het toegepaste isolatiesysteem. De ongeïsoleerde wand is telkens als referentie toegevoegd in grijs ($R=0\text{m}^2\text{K/W}$). De 75-percentiel lijn voor XPS is weergegeven met de zwarte lijn op de figuur linksboven en herhaald ter vergelijking als grijze lijn in de drie andere figuren. Figuur overgenomen uit het RiBuild-eindrapport [5].*

Het risico op schimmelgroei op het binnenoppervlak is geëvalueerd via de maximale schimmelindex, zoals voorspeld met het VTT schimmelgroei model gedurende het laatste jaar van de simulatie. Het binnenoppervlak was daarbij gekarakteriseerd als 'erg schimmelgevoelig'. De resultaten zijn nu weergegeven als stippenplots, waarbij de grootte van de stip geschaald is naar frequentie van voorkomen. Omwille van de hoge dampweerstand van de dampdichte systemen zal vocht vanuit het metselwerk niet tot het binnenoppervlak geraken. Er wordt dan ook geen schimmelgroei voorspeld op de gipskartonplaten van deze systemen. Bij de calciumsilicaatisolatie kan het vocht zich wel naar binnen verplaatsen. Het gevolg is dat voor sommige randvoorwaarden en bij kleinere diktes, de waarde van 0 soms overschreven wordt. Merk echter op dat voor alle na-isolatiesystemen en toegepaste diktes, het risico op schimmelgroei altijd lager is dan voor de ongeïsoleerde wand.

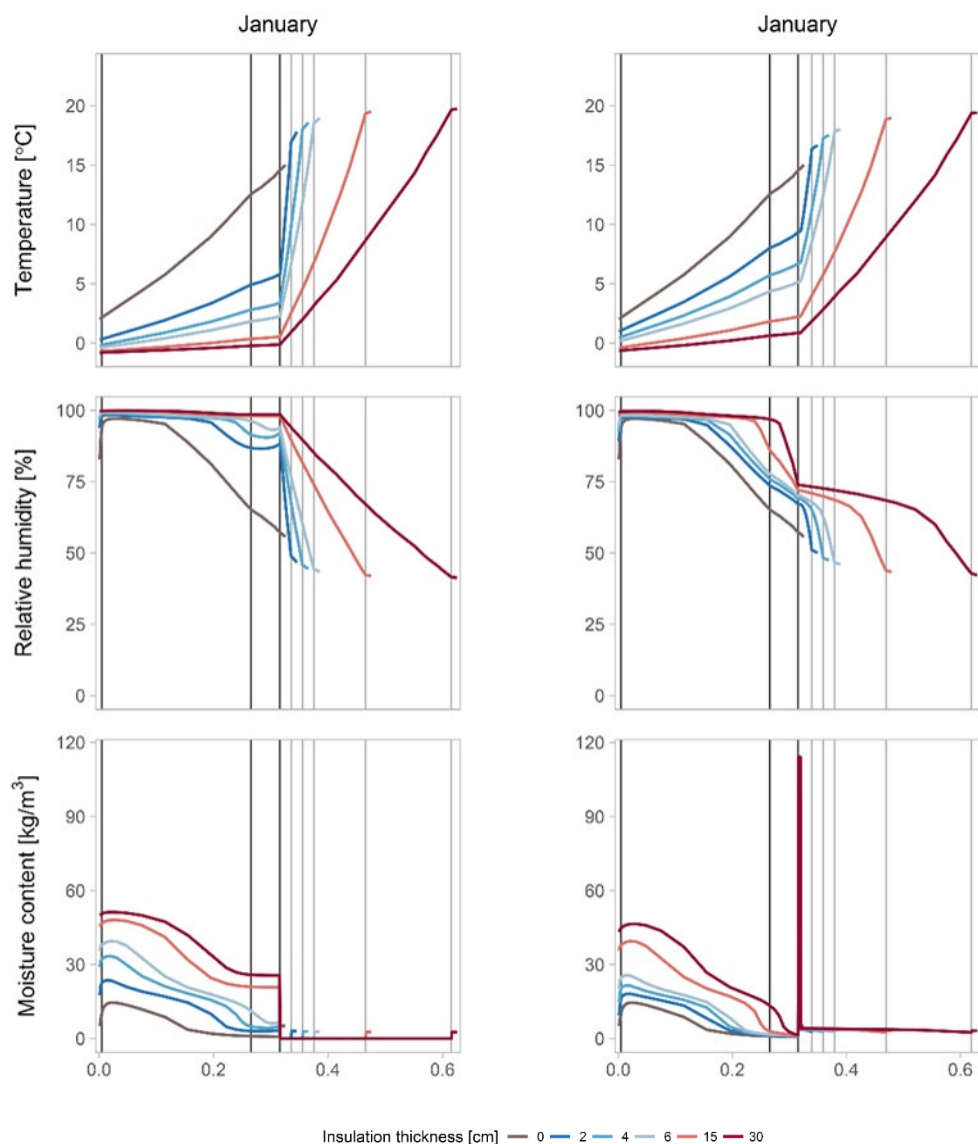


Figuur 19 Stippenplots met de frequentie van voorkomen van de maximale schimmelindex gedurende het laatste jaar zoals voorspeld voor het binnenoppervlak als functie van de (droge) thermische weerstand van het toegepaste isolatiesysteem. De ongeïsoleerde wand is telkens als referentie toegevoegd in grijs ($R=0\text{m}^2\text{K/W}$). De zwarte lijn komt overeen met de 75-percentiel lijn van de verdeling voor elk isolatietype. Figuur overgenomen uit het RiBuild-eindrapport [5].

De maximale schimmelindex op de scheiding tussen isolatie en metselwerkwand is weergegeven in Figuur 20. Toepassing van een dampdicht isolatiesysteem doet de relatieve vochtigheid op deze positie sterk stijgen met een sterke stijging van de schimmelindex tot gevolg. Merk op dat dit zich reeds voordoet voor erg beperkte isolatiediktes. Aangezien calciumsilicaat veel dampopener is, wat uitdroging van het metselwerk naar binnen mogelijk maakt, blijft de schimmelindex voor dit systeem veel lager en meer in lijn met de ongeïsoleerde wand. Bij toenemende diktes (wat leidt tot een stijging in de dampweerstand) stijgt echter ook voor dit systeem de schimmelindex langzaam. Dit effect wordt erg duidelijk als men vochtprofielen voor bv. een wand geïsoleerd met XPS vergelijkt met deze voor een wand geïsoleerd met calciumsilicaat (zie figuur 21). Het is duidelijk dat de relatieve vochtigheid en de vochtgehalten dieper in het metselwerk veel hoger zijn voor wanden geïsoleerd met een dampdicht systeem. Voor het dampopen systeem (de wand geïsoleerd met calciumsilicaat) zijn de profielen veel meer in lijn met de profielen die teruggevonden worden in de ongeïsoleerde wand. Dit verkleint het risico op schimmelgroei in het contactvlak tussen isolatie en metselwerk.



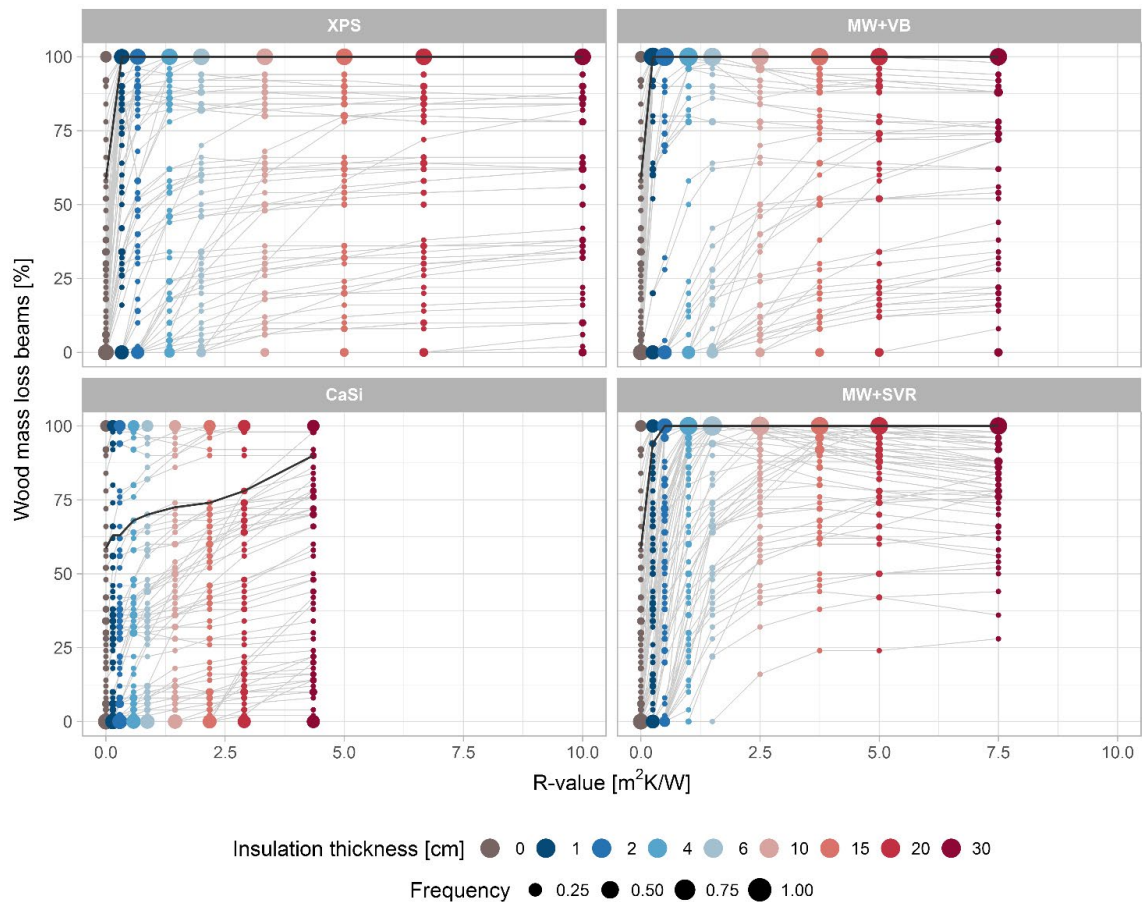
Figuur 20 Stippenplots met de frequentie van voorkomen van de maximale schimmelindex gedurende het laatste jaar zoals voorspeld voor het scheidingsvalk tussen metselwerk en isolatie als functie van de (droge) thermische weerstand van het toegepaste isolatiesysteem. De ongeïsoleerde wand is telkens als referentie toegevoegd in grijs ($R=0\text{m}^2\text{K/W}$). De zwarte lijn komt overeen met de 75-percentiel lijn van de verdeling voor elk isolatietype. Figuur overgenomen uit het RiBuild-eindrapport [5].



Figuur 21 Gemiddeld profiel van temperatuur, relatieve vochtigheid en vochtgehalte gedurende de maand Januari van het laatste jaar voor een wand geïsoleerd met XPS (links) en met calciumsilicaat (rechts). De profielen van de ongeïsoleerde wand zijn weergegeven in grijs. De kleuren van blauw naar rood geven de verschillende isolatiediktes weer.

Ook het risico op aantasting van ingewerkte houten balken zal om dezelfde reden lager liggen in wanden geïsoleerd met een dampopen systeem t.o.v. wanden geïsoleerd met een dampdicht systeem. Dit is duidelijk zichtbaar op figuur 22, dat het voorspelde massaverlies voor ingewerkte balken (erg vereenvoudigd) voorspeld op basis van de temperatuur en relatieve vochtigheid zoals voorspeld op positie 3 in het metselwerk (zie figuur 16).

Een diepgaandere analyse van de bekomen resultaten met ondermeer de link met de slagregenbelasting is terug te vinden in het RiBuild-eindrapport [5].



Figuur 22 Stippenplots met de frequentie van verlies aan houtmassa van ingewerkte houten balken gedurende het laatste jaar zoals vereenvoudigd voorspeld op basis van 1D-berekening van temperatuur en relatieve vochtigheid. De ongeïsoleerde wand is telkens als referentie toegevoegd in grijs ($R=0\text{m}^2\text{K/W}$). De zwarte lijn komt overeen met de 75-percentiel lijn van de verdeling voor elk isolatietype. Figuur overgenomen uit het RiBuild-eindrapport [5].

4 Besluit

Hygrothermische modellering speelt een belangrijke rol bij het inschatten van de mogelijke risico's als gevolg van na-isolatie aan de binnenzijde van gevels. Voor een goede simulatie zijn veel invoergegevens benodigd waaronder gedetailleerde eigenschappen van de gebruikte materialen, weergegevens, randvoorwaarden aan de binnenzijde en begincondities. Niet altijd is dergelijke informatie met voldoende detail aanwezig en zal men aangewezen zijn op inschattingen of standaardmaterialen. Dit brengt onherroepelijk onzekerheden met zich mee. Daarnaast kunnen ontwerpmogelijkheden en toekomstige scenario's een rol spelen bij de risico-inschatting. Dit alles maakt dat een probabilistische aanpak wenselijk of noodzakelijk kan zijn. Op basis van een probabilistische benadering kunnen verschillende ontwerpvarianten met elkaar worden vergeleken en kan worden bepaald welk van deze varianten een lager risico geeft op vorstschade, schimmelgroei en houtmassaverlies en welke variant de hoogste energiebesparing geeft. Hierdoor kan een zorgvuldige afweging in de materiaalkeuze worden gemaakt en een goede inschatting worden gemaakt van te verwachten risico's.

5 Referenties

- [1] project in opdracht van de Rijksdienst voor Cultureel Erfgoed Nederland: Energetische prestaties van massieve bakstenen gevels in woonhuismonumenten.
<https://www.monumentenkenis.nl/52/kennis/lopend-onderzoek.html>
- [2] Hens, H, 2011. Applied Building Physics. 1ste druk, Ernst & Sohn, Berlijn.
- [3] Van Gelder L, Janssen H, Roels S, 2014. Probabilistic design and analysis of building performances: methodology and application example. *Energy and Buildings* 79: 202-211. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.04.042
- [4] Tijskens A, Neural networks as metamodel for hygrothermal simulations of building components – reducing the calculation time of probabilistic assessments. PhD-thesis KU Leuven, Belgium, 2021.
- [5] European H2020 Ribuild project: Robust Internal Thermal Insulation of Historic Buildings. Rapporten te downloaden via www.ribuild.eu/knowledge-base/#research