

Inleiding

Energetische prestaties van massieve baksteengevels in woonhuismonumenten

Quist, W.J.; de Jong, Nanette

Publication date

2024

Document Version

Final published version

Published in

Energetische prestaties van massieve baksteengevels in woonhuismonumenten

Citation (APA)

Quist, W. J., & de Jong, N. (2024). Inleiding: Energetische prestaties van massieve baksteengevels in woonhuismonumenten. In W. J. Quist (Ed.), *Energetische prestaties van massieve baksteengevels in woonhuismonumenten: Syllabus bij het eindsymposium op 20 november 2024 van MonumentenKennis 2019-2024* (pp. 5-7)

Important note

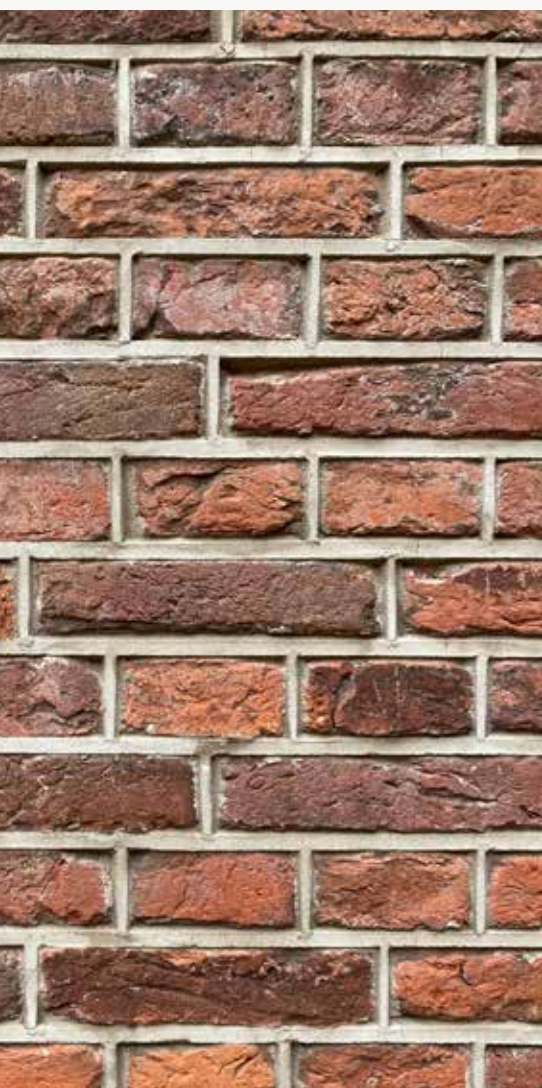
To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

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.



ENERGETISCHE PRESTATIES VAN MASSIEVE BAKSTEENGEVELS IN WOONHUISMONUMENTEN

ENERGETISCHE PRESTATIES VAN MASSIEVE BAKSTEENGEVELS IN WOONHUISMONUMENTEN

SYLLABUS BIJ HET EINDSYMPOSIUM OP 20 NOVEMBER 2024
VAN MONUMENTENKENNIS 2019-2024

Kaderregeling 126762

Faculteit Bouwkunde, TU Delft
Afdeling Bouwfysica en Duurzaam Bouwen, KU Leuven
Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed

Editor:
WIDO QUIST

INHOUDSOPGAVE

Inleiding	5
<i>Wido Quist, Nanette de Jong</i>	
Binnenisolatiesystemen: werking, consequenties en aandachtspunten	9
<i>Marc Stappers, Evy Vereecken en Jill Vervoort</i>	
Karakterisering van historische bakstenen op basis van laboratoriummetingen	19
<i>Staf Roels</i>	
Praktijkmetingen van de thermische prestatie en luchtdichtheid in monumentale woningen	25
<i>Zara Huijbregts</i>	
Na-isolatie van historisch baksteenmetselwerk: in-situ monitoring en simulatie van twee casussen	47
<i>Staf Roels, Evy Vereecken, Martin Tenpierik en Marc Stappers</i>	
Houten balkkoppen en binnenisolatie: risico's en aandachtspunten	67
<i>Marc Stappers, Evy Vereecken en Jill Vervoort</i>	

INLEIDING

Wido Quist, TU Delft; Nanette de Jong, RCE

1. Inleiding

Voor woonhuismonumenten is binnenisolatie vaak de enige manier om de thermische prestatie van het massief metselwerk te verbeteren. Maar tegenvallende isolatiewaardes, vorstschade, schimmelgroei of houtrot van ingewerkte houten balken liggen op de loer. De veelheid aan isolatiesystemen, die elk pretenderen dé oplossing te zijn, maakt het voor eigenaren moeilijk om te besluiten of na-isolatie een veilige keuze is voor hun gebouw en welk systeem dan de voorkeur geniet.

In deze syllabus, die wordt uitgegeven bij het symposium op 20 november 2024 met als titel Energetische prestaties van massieve baksteengevels in woonhuismonumenten, wordt verslag gedaan van het onderzoek dat in de periode 2019-2024 is uitgevoerd naar massief baksteenmetselwerk. Het onderzoek vond plaats in de context van de programmatische samenwerking MonumentenKennis (fase 2) waarin werd samengewerkt door secties Heritage & Architecture en Environmental & Climate Design van de Faculteit Bouwkunde, TU Delft, de afdeling Bouwfysica en Duurzaam Bouwen van de KU Leuven en de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. Het project heeft plaatsgevonden binnen het programma Erfgoed en Duurzaamheid van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed en is gefinancierd binnen de Kaderregeling van het Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap.

2. Achtergrond

De wens tot energiebesparing – gemeten in de uitstoot van CO₂ – is ook van toepassing op monumentale gebouwen. Veel eigenaar-bewoners van monumentale woningen zijn bereid om te investeren en aangezien er vaak veel energie verloren gaat door de historische gebouwschil is dit één van de eerstaangewezen gebouwonderdelen die in aanmerking komt voor interventies. Met het oog op advisering ten behoeve van ingrepen blijkt het vaak lastig om het huidige bouwfysisch gedrag van de historische gebouwschil goed in te schatten. Als gevolg hiervan is ook het uiteindelijke bouwfysisch gedrag van de gebouwschil na interventie moeilijk te voorspellen. Diverse metingen, proefberekeningen, modelleren en materiaalonderzoeken laten zien dat het gedrag van massieve, historische baksteengevels anders is dan met de huidige methoden voor nieuwbouwconstructies kan worden bepaald of voorspeld.

Het project heeft zich gericht op de – van nieuwbouw afwijkende – parameters die van invloed zijn op het bouwfysisch gedrag van monumentale massieve bakstenen woonhuisgevels (en op andere als woonhuis in gebruik zijnde monumenten). Wanneer we deze parameters en hun afhankelijkheden beter begrijpen kan er gericht en met minder risico voor behoud van de cultuurhistorische waarden worden geïntervenieerd. Om inzicht te krijgen in het bouwfysisch gedrag van monumentale massieve bakstenen woonhuisgevels zijn metingen in praktijksituaties gecombineerd met materiaalonderzoek in het laboratorium, computersimulatie en verificatie.

De vijf hoofdonderwerpen van het onderzoek waren:

- Isolatiewaarde en luchtdichtheid historische bakstenen gevels
- Karakterisering van historische bakstenen
- Effecten van isolatie op historische bakstenen gevels
- Modelleren/verificatie
- Kennisdeling

3. Inhoud

De eerste resultaten van het onderzoek zijn in november 2023 in Brussel gepresenteerd tijdens een symposium, georganiseerd door WTA Nederland-Vlaanderen.¹ De huidige syllabus vormt een inhoudelijke afronding van het project en bestaat uit vijf bijdragen, geschreven door de onderzoekers binnen het project:

- Binnenisolatiesystemen: werking, consequenties en aandachtspunten
- Karakterisering van historische bakstenen op basis van laboratoriummetingen
- Praktijkmetingen van de thermische prestatie en luchtdichtheid in monumentale woningen
- Na-isolatie van historisch baksteenmetselwerk: in-situ monitoring en simulatie van twee casussen
- Houten balkkoppen en binnenisolatie: risico's en aandachtspunten

De eerste bijdrage in deze syllabus, geschreven door Marc Stappers, Evy Vereecken en Jill Vervoort, geeft een overzicht van zeven verschillende systemen voor binnenisolatie. De werking van de systemen wordt toegelicht met aandacht voor de mogelijke gevolgen voor monumenten en het vermijden van bouwfysische schade.

Het tweede hoofdstuk, door Staf Roels, presenteert de resultaten van laboratoriumonderzoek van meer dan 100 verschillende historische bakstenen, verzameld uit gebouwen opgericht tussen 1500 en 1950. Deze bakstenen zijn onderworpen aan verschillende testen om hun dichtheid, capillair vochtgehalte, warmtetransporteigenschappen e.d. te bepalen. De uitkomsten leveren een belangrijke bijdrage aan onze kennis over historische bakstenen en hoe we daar mee om moeten gaan tijdens energetische renovatie om zeker geen schade te initiëren na een isolatie-ingreep.

Zara Huijbregts gaat in de derde bijdrage aan deze syllabus in op energieverliezen door transmissie en infiltratie in monumentale woningen met massieve baksteengevels. Hiervoor zijn praktijkmetingen uitgevoerd van de thermische prestatie en luchtdichtheid van diverse casussen in Nederland.

De vierde bijdrage van deze syllabus is geschreven door Staf Roels, Evy Vereecken, Martin Tenpierik en Marc Stappers en gaat in op twee concrete casussen waarbij via een intensieve meetcampagne de hygrothermische prestaties van het na-isolatiesysteem onderzocht werd. Daarna zijn de gemeten prestaties vergeleken met numerieke voorspellingen.

Bijdrage vijf, door Marc Stappers, Evy Vereecken en Jill Vervoort, bespreekt de risico's en aandachtspunten bij plaatsing van binnenisolatie in situaties waar houten balken ingewerkt zijn in massief bakstenen buitenmuren.

¹ De syllabus van deze WTA-studiedag is te downloaden via <https://www.wta-international.org/de/nationale-gruppen/wta-nederland-vlaanderen/downloads/>

De kennis uit deze hoofdstukken, inclusief de onderliggende data zal ook digitaal en in andere vormen verspreid worden, ten behoeve van de restauratiepraktijk.

4. Belangrijkste bevindingen

In het projectplan voor MonumentenKennis 2019-2024 is de ambitie uitgesproken om de uitkomsten van het onderzoek dusdanig te presenteren dat deze inzichtelijk zijn voor (particuliere) monumenteigenaren en toegepast kunnen worden door bouwkundige adviseurs zonder specifieke bouwfysische achtergrond. Het doel hiervan is dat dit begrip van het bestaande leidt tot de juiste afwegingen voor het doen van interventies in monumentale massieve bakstenen woonhuisgevels.

Gaandeweg het project en zeker aan het einde is hier veel over gesproken en zijn diverse formuleringen de revue gepasseerd. Het blijkt echter nog niet zo eenvoudig te zijn om korte, bondige conclusies te trekken uit de onderzoeken en deze te formuleren als inzichtelijk adviezen. De werkelijkheid blijkt – en dat klinkt als een cliché – complex en maar weinig situaties zijn exact hetzelfde.

In de vorm van take-aways is aan iedere bijdrage een korte opsomming van de belangrijkste bevindingen toegevoegd. In de context van de tekst ervoor zijn deze zeker bruikbaar als genuanceerde adviezen. Wanneer de onderzoeken bij elkaar worden genomen dan springen onderstaande punten nadrukkelijk naar voren; deze gelden dan ook als de belangrijkste conclusies van het onderzoek:

- De luchtdichtheid van monumenten is over het algemeen laag. Na restauratie is dit vaak nog steeds het geval omdat er luchtlekken in de gevel blijven zitten rondom bijvoorbeeld leidingdoorvoeren en bouwkundige aansluitingen.
- Massief historisch baksteenmetselwerk isoleert 20-30% beter dan massief modern metselwerk. Reden om misschien niet alle gevels te isoleren, bijvoorbeeld de gevels die vaak nat zijn.
- Diy tip: Op basis van gewicht en volume kunnen veel eigenschappen van een historische baksteen worden voorspeld.
- Gevels, veelal op het zuid-westen, die slagregen krijgen zijn de meest kritische gevels. Slagregen heeft grote, negatieve invloed op het vochtgedrag. Zorg dat slagregen niet kan indringen door goede bouwkundige aansluitingen en bijvoorbeeld voegwerk dat in orde is.
- Doe vaker en meer metingen van het bouwfysisch gedrag van massief baksteenmetselwerk om het juiste type isolatie te kunnen kiezen.
- Uitvoeringskwaliteit is essentieel bij binnenisolatie en dit gaat verder dan dat we vaak denken. Let bijvoorbeeld goed op het *aflopen* van de isolatie om een luchtdichte constructie te krijgen.
- Hoe nauwkeuriger de materiaaleigenschappen en het klimaat in een simulatiemodel worden ingevoerd hoe beter het model overeenkomst met de werkelijke situatie. Verkeerde aannames leiden tot verkeerde keuzes.
- Gebruik gemeten materiaaleigenschappen in simulaties. Eigenschappen uit de software-database kunnen afwijkingen als gevolg hebben.
- Na-isolatie vraagt om een multidisciplinaire aanpak.
- Na-isolatie vraagt om systeemdenken.

BINNENISOLATIESYSTEMEN: WERKING, CONSEQUENTIES EN AANDACHTSPUNTEN

Marc Stappers, RCE; Evy Vereecken, KU Leuven en Jill Vervoort, RCE

Samenvatting

In 2023 verscheen in het magazine Monument en Duurzaamheid een bijdrage met als titel 'Zo kies je het juiste isolatiemateriaal' (Stappers 2023) dat in vier stappen tot een keuze komt. Stap 3 hierin gaat over de keuze van een isolatiesysteem. Een overzicht en begrip van de verschillende binnenisolatiesystemen is belangrijk omdat niet elk materiaal in elk systeem gebruikt kan worden en het bestaande gebouw met zijn gebruik en omgeving zeer bepalend is voor het toe te passen systeem. In deze bijdrage wordt de werking van zeven systemen toegelicht en worden de gevolgen voor de monumenten en aandachtspunten voor het vermijden van bouwfysische schade uiteengezet.

1. Inleiding

Het aanbod aan binnenisolatiesystemen is de voorbije decennia enorm toegenomen (zie Figuur 3). Tot ongeveer 2005 waren vooral de traditionele systemen in gebruik. Met de restauratie en verbouwing van het Rijksmuseum in Amsterdam maakte Nederland (2003-2013) voor het eerst kennis met een capillair actief systeem: calcium silicaat (Scheffler and Grunewald 2020; Grunewald, Ruisinger, and Häupl 2006). In (2012) werd de Potgieterschool opgeleverd waarbij het als een van de eerste projecten in Nederland, weliswaar in het dak, gebruik maakte van een innovatieve vochtvariabele folie (Künzel and Kaufmann 1995). Vanaf 2015 kwam met het sluiten van het Klimaatakkoord verduurzaming van erfgoed langzaam in een stroomversnelling en kwamen er ook nieuwe binnenisolatiesystemen en -materialen op de markt. Anno 2024 wordt er steeds vaker 'dampopen' geïsoleerd, soms in combinatie met biobased isolatiematerialen. Maar daar is wel kennis voor nodig. De werking is verschillend en daardoor ook de mogelijk toe te passen isolatiematerialen. Om de verschillen toe te kunnen lichten worden in deze bijdrage de verschillende binnenisolatiesystemen opgedeeld in dampremmende (A-systemen), hybride (B-systemen) en dampopen (C-systemen). Bij elk van deze systemen wordt nog een onderverdeling gemaakt, wat resulteert in de toelichting van zeven verschillende types binnenisolatiesystemen,

2. Algemene bouwfysische consequenties van na-isolatiesystemen aan de binnenzijde

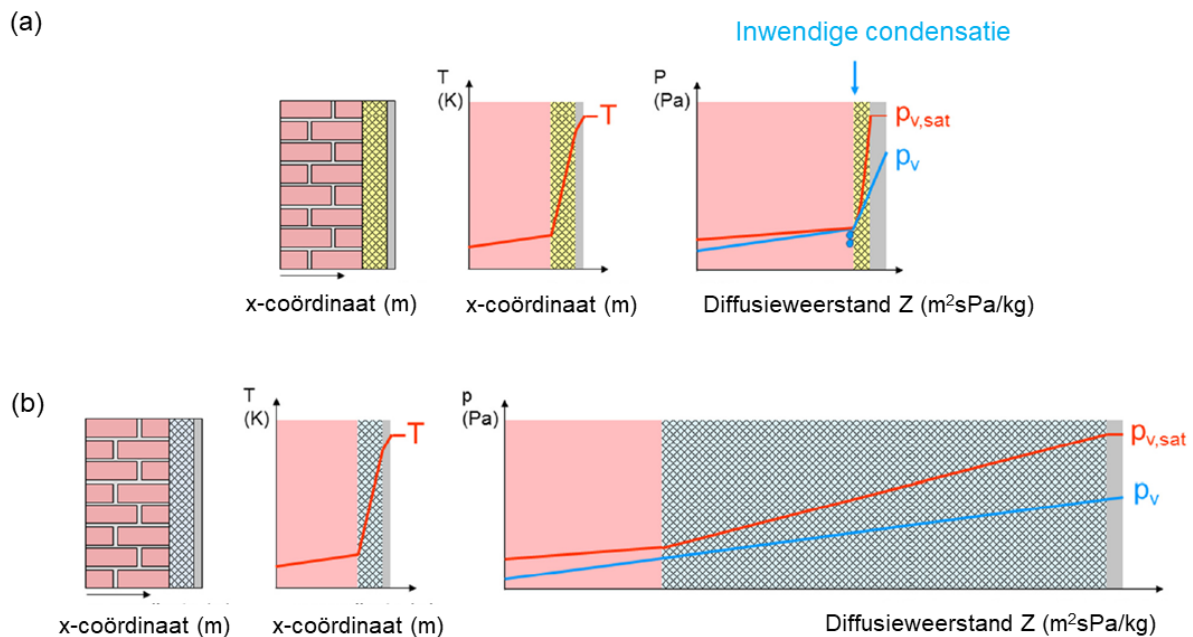
Door de buitengevel na te isoleren, wijzigt het warmte- en vochtgedrag van de gevel, wat aan de basis ligt van het verhoogd risico op schadepatronen. Hieronder zijn drie aandachtspunten kort toegelicht met de benodigde ontwerpregels die hierbij horen om de bouwfysische consequenties te beperken.

2.1 Inwendige condensatie

Om inwendige condensatie te vermijden, geldt vanuit bouwfysisch oogpunt dat (Vereecken and Roels 2023):

- » **Ontwerpregel 1:** de sterkst isolerende laag aan de buitenzijde (koude zijde) van de gevel moet geplaatst worden;
- » **Ontwerpregel 2:** de meest dampdichte laag aan de binnenzijde (warme zijde) van de gevel moet geplaatst worden.

De toepassing van binnenisolatie gaat in tegen de eerste ontwerpregel. Aan de tweede ontwerpregel kan voldaan worden door het gebruik van een binnenisolatiemateriaal met voldoende dampdiffusieweerstand (systeem A1), zoals weergegeven in Figuur 1(b), of door het toevoegen van een dampremmende (vochtvariabele) folie (systeem A2 of B1).



Figuur 1: Schematische weergave van (a) inwendige condensatie bij een dampopen niet-capillair actief binnenisolatiesysteem (C1-systeem), (b) vermijden van inwendige condensatie door toepassing van een dampremmend binnenisolatiesysteem (A1-systeem).

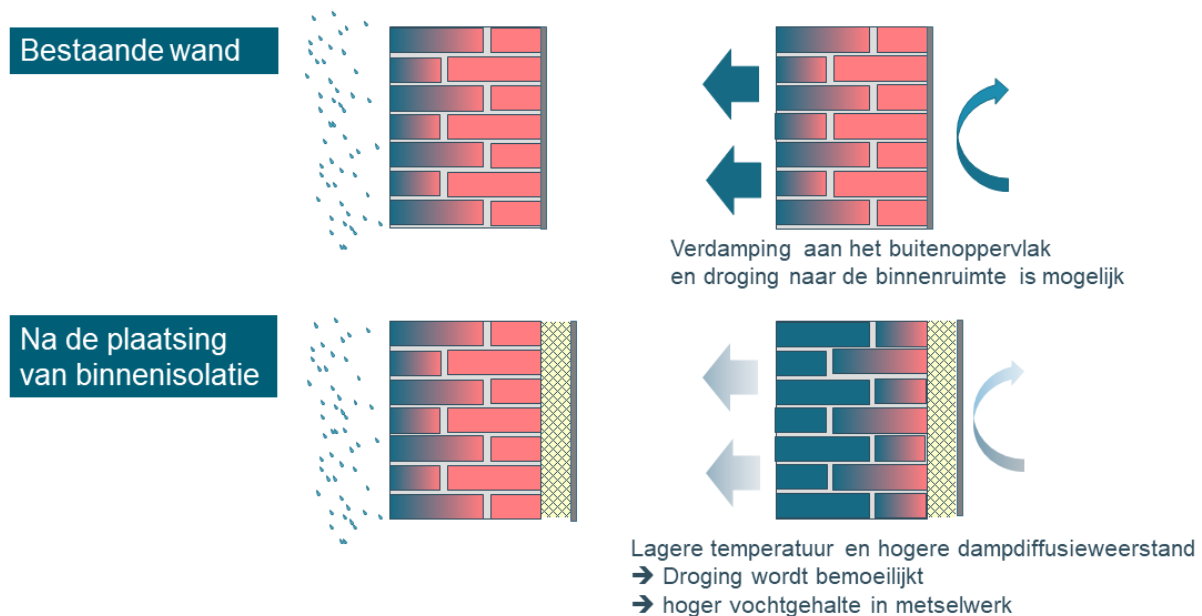
2.2 Vorstschade en houtrot

Door het aanbrengen van een binnenisolatiesysteem neemt de temperatuur van het metselwerk af waardoor het langzamer droogt met mogelijk een verhoogd risico op vorstschade en houtrot van bijvoorbeeld houten balkkoppen tot gevolg. Om vorstschade van het metselwerk aan de buitenzijde en houtrot van vensters, muurplaten, balkkoppen, etc. te voorkomen is het belangrijk om droging te optimaliseren. Het toepassen van de tweede ontwerpregel bemoeilijkt echter ook de droging van de metselwerkwand. Droging naar de binnenomgeving is immers niet meer, of slechts in beperkte mate, mogelijk (Figuur 2). Dit brengt ons tot twee bijkomende ontwerpregels (Vereecken and Roels 2023):

- » **Ontwerpregel 3:** de blootstelling aan vochtbronnen (b.v. slagregen, lekkende goten, opstijgend vocht etc.) moet zo veel mogelijk beperkt worden;
- » **Ontwerpregel 4:** droging naar de binnenomgeving moet zo veel mogelijk toegelaten worden.

Laat het duidelijk zijn dat het voldoen aan zowel de tweede als vierde ontwerpregel een uitdaging vormt. Om zowel de gevolgen van inwendige condensatie te beperken als droging

naar de binnenomgeving toe te laten, zetten de meer recente binnenisolatiesystemen in op dampopen, vochtbufferende (op de markt ook soms verkocht onder de naam 'capillair actieve') systemen (systeem C3).



Figuur 2: Reductie van het drogingspotentieel na de plaatsing van binnenisolatie.

2.3 Lucht- en kierdichting

Een ander belangrijk aspect is het vermijden van luchtstromen van binnen naar buiten via kieren en holtes in het isolatiepakket (Hens 2008). Om die reden nog twee extra ontwerpregels:

- » **Ontwerpregel 5:** aangebrachte binnenisolatiesystemen, alsook aansluitingen (bijvoorbeeld tussen het binnenisolatiesysteem en hierop aansluitende binnengevels, vloerbalken, etc.) moeten luchtdicht zijn;
- » **Ontwerpregel 6:** holtes achter de isolatie moeten zoveel mogelijk worden voorkomen.

In de bijdrage Houten balkkoppen en binnenisolatie: risico's en aandachtspunten verderop in deze syllabus zal voor balkkoppen nader toegelicht worden waarom de luchtdichting zo belangrijk is en hoe die het beste gerealiseerd kan worden.

3. Zeven binnenisolatiesystemen

Er zijn zeven binnenisolatiesystemen te onderscheiden die qua opbouw, werking, impact op de monumentale waarden en bouwfysisch gedrag soms gelijkenissen vertonen en soms heel anders zijn. In Figuur 3 wordt een schematisch overzicht gegeven van de zeven systemen, geclusterd in drie categorieën: A: dampremmende (2), B: hybride (3) en C; dampopen (2) systemen. Daarbij is voor elk systeem voor drie bouwfysische grootheden (warmtegeleidingscoëfficiënt, waterdampdiffusieweerstandgetal en waterabsorptiecoëfficiënt) een indicatie gegeven van de orde grootte voor zowel het isolatiemateriaal als de eventuele folie. Let wel: bij B- en C-systemen kan een grote spreiding in deze eigenschappen teruggevonden worden. Meer info hierover kan teruggevonden worden in (Vereecken and Roels 2016).

METHODE	A Dampdicht (DD)		B Hybride		C Dampopen (DO)		
SYSTEEM	A1 Dampdichte isolatie	A2 Dampopen isolatie met dampremmende laag	B1 Dampopen isolatie met intelligente dampremmende laag	B2 Combinatie van dampremmende en dampopen capillair actieve isolatie ¹⁾	C1 Dampopen niet capillair actieve isolatie (DONCA)	C2 Dampopen beperkt capillair actieve isolatie (DOBCA)	C3 Volledig capillair actieve isolatie (DOCA)
MATERIALEIGENSCHAPPEN	Warmtegeleidingscoëfficiënt (λ) [W/mK]	Laag — — — Verwaarloosbaar	Laag — — — Verwaarloosbaar	Laag — Verwaarloosbaar	Laag	Laag	Laag
	Waterdampdiffusieweerstandsgetal (μ) [-]	Hoog	Laag — — — Hoog	Laag — Variabel	Deels laag, deels hoog — Afhankelijk van product	Laag	Laag
	Waterabsorptiecoëfficiënt (A) [kg/(m ² · s ^{0,5})]	Laag	Bij voorkeur laag — — — Verwaarloosbaar	Bij voorkeur laag — — — Verwaarloosbaar	Deels laag, deels hoog — Verwaarloosbaar	Laag	Beperkt —

Figuur 3: Overzicht van de zeven isolatiesystemen met voor drie bouwfysische grootheden (warmtegeleidingscoëfficiënt, waterdampdiffusieweerstandsgetal en waterabsorptiecoëfficiënt) indicatief aangeven of de waarde voor de isolatie respectievelijk folie hoog of laag is.

In de onderstaande paragrafen worden alle zeven systemen nader toegelicht.

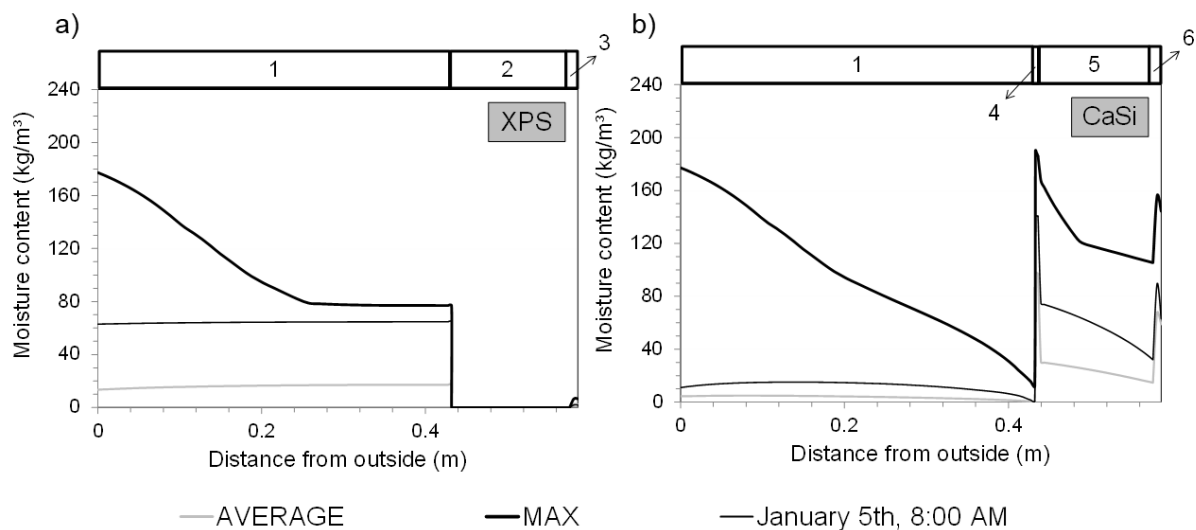
3.1 A. Dampremmende systemen

3.1.1 A1. Dampremmende isolatie (zonder folie)

Bij dit systeem wordt aan de binnenzijde van de buitengevel een isolatielaag met afwerking aangebracht. Die kan direct op de buitengevel worden verlijmd met behulp van een isolatielijm of lijm mortel. Soms is een hulpconstructie van een houten of metalen (metal stud) stijl- en regelwerk nodig. Tussen de stijlen en regels wordt dampremmende isolatie aangebracht. In de meeste gevallen in de vorm van platen. De naden tussen de platen onderling, de platen en de hulpconstructie en de platen en de bestaande constructie, zoals binnenmuren, vloeren, balken, etc., moeten goed luchtdicht zijn. Raadzaam is om deze af te tappen of af te kitten. De uitvoering is bij voorkeur spouwloos. Wanneer een spouw tussen de originele buitenwand en de hulpconstructie wordt gelaten, bijvoorbeeld bij een oneffen binnengevel, is het raadzaam om ook deze spouw op te vullen met isolatie. Daar tussen de stijlen en regels het isolatiemateriaal dampremmend is, mag deze isolatie dampopen zijn, mits deze niet in staat is om vocht op te nemen. De afwerking aan de binnenzijde is met houtplaat en/of gipsplaat, stucwerk en eventuele verflaag.

Door de dikte en de aansluiting van het pakket, wijzigen de ruimteverhoudingen en de detaillering bij de aansluitingen. Doordat het systeem dampremmend en luchtdicht is, is de kans op inwendige condensatie in de winter gering en daarmee het risico op houtrot. Let op: ondanks dat het risico op inwendige condensatie gering is, kan slagregen toch zorgen voor een hoger houtvochtgehalte in bijvoorbeeld balkkoppen (Figuur 4, Vereecken et al. 2015), zeker wanneer de balkkop tot dicht bij het buitenoppervlak komt, zoals bij dunne muren. Ook neemt de temperatuur van het metselwerk in de winter af en neemt de kans op vorstschade bij regenbelaste gevels toe. Het droogpotentieel is om ten gevolge van de diffusieweerstand van het binnenisolatiesysteem en de lagere temperatuur in het metselwerk in de zomer ook lager.

Typische isolatiematerialen zijn: PIR, EPS, XPS.



Figuur 4: Vochtprofielen in een wand met (a) een dampremmend systeem (A1-systeem) en (b) een dampopen capillair actief systeem (C3-systeem) [3]. (1 = baksteen, 2 = XPS, 3 = gipskarton, 4 = lijm mortel, 5 = calciumsilicaat, 6 = pleister).

3.1.2 A2. Dampopen isolatie en dampremmende folie

Bij dit systeem wordt aan de binnenzijde van de buitengevel een isolatielaag met afwerking aangebracht. In de meeste gevallen is daarvoor een hulpconstructie nodig van een houten of metalen (metal stud) stijl- en regelwerk. Tussen de stijlen en regels wordt dampopen isolatie aangebracht. In de meeste gevallen in de vorm van dekens of losse vulling. De dampdichting wordt verkregen door het aanbrengen van een dampremmende folie aan de warme zijde van de isolatie (tussen isolatie en binnenaafwerking). De naden tussen de foliebanen onderling en tussen de folie en de bestaande constructie, zoals binnenmuren, vloeren, balken, etc., moeten goed luchtdicht zijn. Raadzaam is om deze af te tappen. De uitvoering is bij voorkeur spouwloos. Wanneer een spouw tussen de originele buitenwand en de hulpconstructie wordt gelaten, bijvoorbeeld bij een oneffen binnengevel, is het raadzaam om ook deze spouw op te vullen met hetzelfde isolatiemateriaal. De afwerking aan de binnenzijde is met houtplaat en/of gipsplaat, stucwerk en eventuele verflaag.

De gevolgen voor de monumentale waarden en de temperatuur- en vochthuishouding zijn gelijk aan systeem A1.

Typische isolatiematerialen zijn: steenwol, rotswol, schapenwol.

3.2 B. Hybride systemen

3.2.1 B1. Dampopen isolatie en vochtvariabele folie

Bij dit systeem wordt aan de binnenzijde van de buitengevel een isolatielaag met afwerking aangebracht. In de meeste gevallen is daarvoor een hulpconstructie nodig van een houten of metalen (metal stud) stijl- en regelwerk. Tussen de stijlen en regels wordt dampopen isolatie aangebracht. In de meeste gevallen in de vorm van dekens of losse vulling. De dampdichting wordt verkregen door het aanbrengen van een vochtvariabele folie aan de warme zijde van de isolatie (tussen isolatie en binnenaafwerking). De naden tussen de foliebanen onderling en tussen de folie en de bestaande constructie, zoals binnenmuren, vloeren, balken, etc., moeten goed luchtdicht zijn. Raadzaam is om deze af te tappen. De uitvoering is bij voorkeur spouwloos. Wanneer een spouw tussen de originele wand en de

hulpconstructie wordt gelaten, bijvoorbeeld bij een oneffen binnengevel, is het raadzaam om ook deze spouw op te vullen met hetzelfde isolatiemateriaal. De afwerking aan de binnenzijde is met houtplaat en/of gipsplaat, stucwerk en eventuele verflaag.

De gevolgen voor de monumentale waarden zijn gelijk aan systeem A1. Doordat de folie vochtvariabel is, wordt condensatie in de winter vermeden (de folie heeft dan een hoge Sd-waarde, dus een hoge dampdiffusieweerstand) en wordt droging in de zomer minder beperkt (de folie heeft dan een lage Sd-waarde, dus een lage dampdiffusieweerstand).

Typische isolatiematerialen zijn: steenwol, rotswol, schapenwol.

3.2.2 B2. Combinatie van dampremmende en dampopen capillair actieve isolatiematerialen

Bij dit systeem wordt aan de binnenzijde van de buitengevel een isolatielaag met afwerking aangebracht die met behulp van een egaliserende lijm mortel volvlakkig tegen de buitengevel verlijmd wordt. Het isolatiemateriaal, meestal een plaatmateriaal, is een combinatie van een dampremmend en dampopen capillair actief materiaal. De naden tussen de platen onderling en tussen het plaatmateriaal en de bestaande constructie, zoals binnenmuren, vloeren, balken, etc., moeten goed luchtdicht zijn.

De gevolgen voor de monumentale waarden zijn doorgaans wat groter dan bij de systemen met hulpconstructie (systemen A1, A2, B1 en C1). De reden daarvoor is dat voor een goede verlijming de ondergrond vlak moet zijn en dat een hydraulisch contact tussen de lijm mortel en het metselwerk (alook tussen de lijm mortel en het isolatiemateriaal) aanwezig moet zijn. Dat maakt dat bestaande afwerkingslagen verwijderd moeten worden en dat gebreken aan het metselwerk hersteld moeten zijn voor een juiste werking. Door de combinatie van twee verschillende materialen met verschillende vochteigenschappen wordt het bouwfysische gedrag onvoorspelbaar en dus risicovol (Vereecken and Roels 2016).

Typische isolatiematerialen zijn: calciumsilicaat in combinatie met bijvoorbeeld PUR of vacuümpanelen.

3.3 C. Dampopen systemen

3.3.1 C1. Dampopen niet-capillair actief

Bij dit systeem wordt aan de binnenzijde van de buitengevel een isolatielaag met afwerking aangebracht. In de meeste gevallen is daarvoor een hulpconstructie nodig van een houten of metalen (metal stud) stijl- en regelwerk. Tussen de stijlen en regels wordt dampopen niet vochtabsorberende isolatie aangebracht, dit in de meeste gevallen in de vorm van dekens. De naden tussen de dekens onderling, de dekens en de hulpconstructie en de dekens en de bestaande constructie, zoals binnenmuren, vloeren, balken, etc., moeten goed aansluiten. De uitvoering is bij voorkeur spouwloos. Wanneer een spouw tussen de originele buitengevel en de hulpconstructie wordt gelaten, bijvoorbeeld bij een oneffen binnengevel, is het raadzaam om ook deze spouw op te vullen met isolatie. De afwerking aan de binnenzijde is met houtplaat en/of gipsplaat, stucwerk en eventuele verflaag. Een dampremmende laag ontbreekt.

Door de dikte en de aansluiting van het isolatiepakket, wijzigen de ruimteverhoudingen en de detaillering bij de aansluitingen. Doordat het systeem niet dampremmend en matig luchtdicht is, is de kans op inwendige condensatie in de winter groot en daarmee ook het risico op houtrot. Dit is de reden dat dit systeem in de meeste gevallen wordt afgeraden.

Door het ontbreken van een dampremmende laag is het droogpotentieel in de zomer groter, maar zelden groot genoeg om te voorkomen dat het materiaalvochtgehalte toeneemt.¹

Typische isolatiematerialen zijn: steenwol, rotswol, schapenwol.

3.3.2 C2. Dampopen en beperkt capillair actief

Bij dit systeem wordt aan de binnenzijde van de buitengevel een isolatielaag met afwerking aangebracht die met behulp van een egaliserende lijm mortel die volvlakig tegen de buitengevel verlijmd wordt. Het isolatiemateriaal, meestal een plaatmateriaal, is dampopen en beperkt vochtbufferend. De naden tussen de platen onderling en tussen het plaatmateriaal en de bestaande constructie, zoals binnenmuren, vloeren, balken, etc., moeten goed luchtdicht zijn.

De gevolgen voor de monumentale waarden zijn doorgaans wat groter dan bij de systemen met hulpconstructie (systemen A1, A2, B1 en C1). De reden daarvoor is dat voor een goede verlijming de ondergrond vlak moet zijn en dat een hydraulisch contact tussen de lijm mortel en het metselwerk (alsook tussen de lijm mortel en het isolatiemateriaal) aanwezig moet zijn. Dat maakt dat bestaande afwerkingslagen verwijderd moeten worden en dat gebreken aan het metselwerk (bijvoorbeeld losse metselwerkvoegen) hersteld moeten zijn voor een juiste werking. Doordat het materiaal dampopen is, kan er mogelijks inwendige condensatie ontstaan. Door het vochtbufferend vermogen kan een deel daarvan door het isolatiemateriaal worden opgenomen. Door de beperkte (of eerder verwaarloosbare) capillaire werking kan (slechts) een deel ervan naar de warme zijde (binnenoppervlak) getransporteerd worden (Vereecken and Roels 2014; Vereecken and Roels 2016), maar dat zal niet altijd vermijden dat het metselwerk (zeer) nat wordt. Het bouwfysische gedrag wordt daardoor onvoorspelbaar en dus risicovol. Doordat het materiaal dampopen is kan het vocht uit het materiaal naar binnen toe gemakkelijker drogen (in vergelijking tot de dampremmende systemen) mits de dikte niet al te groot is; mogelijk is de grens vergelijkbaar met die van C3-systemen welke lijkt te liggen rond een dikte van 15 cm of meer (Tijssens, Janssen, and Roels 2017). De aanwezigheid van vocht in het isolatiemateriaal kan een reductie van de thermische weerstand (ten opzichte van de droge toestand) tot gevolg hebben.

Typische isolatiematerialen zijn: isolatieplaten uit cellenbeton en sommige houtvezelisolatiesystemen, houtwol.

3.3.3 C3. Dampopen capillair actief

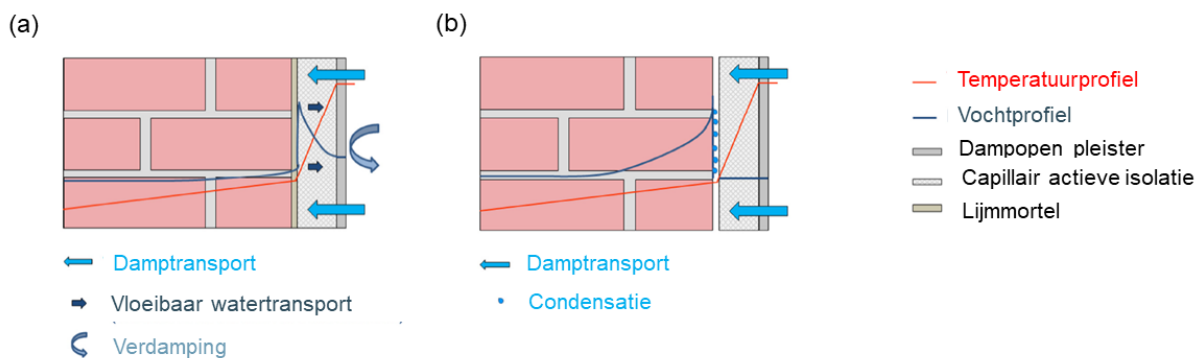
Bij dit systeem wordt aan de binnenzijde van de buitengevel een isolatielaag met afwerking aangebracht die met behulp van een egaliserende lijm mortel die volvlakig tegen de buitengevel verlijmd wordt. Het isolatiemateriaal, meestal een plaatmateriaal, is dampopen, vochtbufferend en capillair actief. De naden tussen de platen onderling en tussen het plaatmateriaal en de bestaande constructie, zoals binnenmuren, vloeren, balken, etc., moeten goed luchtdicht zijn.

De gevolgen voor de monumentale waarden zijn doorgaans wat groter dan bij de systemen met hulpconstructie (systemen A1, A2, B1 en C1). De reden daarvoor is dat voor een goede verlijming de ondergrond vlak moet zijn en dat voor het hydraulisch contact de lijm mortel direct op de baksteen moet worden aangebracht (Scheffler and Grunewald 2020), zie Figuur 5. Dat maakt dat bestaande afwerkingslagen verwijderd moeten worden en dat gebreken

¹ Alleen bij gebouwen of vertrekken met een zeer lage relatieve luchtvochtigheid, dus lage vochtproductie kan, met behulp van voldoende ventilatie, een droogoverschot worden verkregen.

aan het metselwerk (bijvoorbeeld losse metselwerkvoegen) hersteld moeten zijn voor een juiste werking. Doordat het materiaal dampopen is, kan er mogelijks inwendige condensatie ontstaan. Door de vochtbuffering en capillaire werking kan deze eenvoudig door het isolatiemateriaal worden opgenomen en naar de warme zijde (binnenoppervlak) getransporteerd worden (Evy Vereecken and Roels 2014; E. Vereecken and Roels 2016), wat voorkomt dat het metselwerk zeer nat wordt. Doordat het materiaal dampopen is kan het vocht uit het materiaal naar binnen toe gemakkelijker drogen mits de dikte niet al te groot is; de grens lijkt te liggen rond een dikte van 15 cm of meer (Tijskens, Janssen, and Roels 2017). De aanwezigheid van vocht in het isolatiemateriaal heeft wel een reductie van de thermische weerstand (t.o.v. de droge toestand) tot gevolg (Evy Vereecken et al. 2015).

Typische isolatiematerialen zijn: calcium silicaat.



Figuur 5: Schematische weergave van een capillair actief binnenisolatiesysteem (C3-systeem) waarbij in (a) het vochttransport op de juiste wijze plaats vindt en waarbij in (b) het falen van het capillair actief binnenisolatiesysteem ten gevolge van een slecht contact (luchtspleet) tussen de metselwerkmuur en het binnenisolatiesysteem is weergegeven.

4. Besluit

Bij het na-isoleren van ons historische erfgoed is het vermijden van bouwfysische risico's belangrijk. De zes genoemde ontwerpregels helpen daarbij. Maar tegenwoordig zijn er verschillende isolatiesystemen en -materialen op de markt en die presteren niet allemaal hetzelfde. Er zijn hierboven zeven verschillende systemen onderscheiden en toegelicht. Sommigen proberen condensatie in de winter zoveel mogelijk te voorkomen (ontwerpregel 2, systemen A1, A2 en B1). Andere systemen proberen de droging in de zomer zoveel mogelijk te bevorderen (ontwerpregel 4, systemen B1 en C3). Door een beter begrip van de werking van deze systemen kan beter ingeschat worden welke materialen geschikt zijn voor welk systeem en onder welke omstandigheden, en kan bouwfysische schade vermeden worden.

TAKE-AWAYS

- **De dag van vandaag zijn verschillende binnenisolatiesystemen op de markt, welke op te delen zijn in (A) dampremmende, (B) hybride en (C) dampopen (al dan niet vochtbufferende/capillair actieve) systemen.**
- **Elk van de verschillende binnenisolatiesystemen (dampremmend, hybride en dampopen) vertoont een verschillend gedrag. Een goed begrip van deze binnenisolatiesystemen is noodzakelijk om tot een goede keuze te komen.**

5. Referenties

- Grunewald, J, U Ruisinger, and P Häupl. 2006. "The Rijksmuseum Amsterdam - Hygrothermal Analysis and Dimensioning of Thermal Insulation."
- Hens, H. 2008. "Koudeburggen en luchtdichtheid: berekening, impact op de gebouwprestaties." In *ATIC Studiemiddag Koudebruggen*, 14.
- Künzel, H.M., and A. Kaufmann. 1995. "Feuchteadaptive Dampfbremse für Gebäudedämmungen."
- Scheffler, G., and J. Grunewald. 2020. "Material Development and Optimisation Supported by Numerical Simulation for a Capillary-Active inside Insulation Material." In *Research in Building Physics*, edited by J. Carmeliet, H. Hens, and G. Vermeir, 1st ed., 77–85. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003078852-13>.
- Stappers, M. 2023. "Zo kies je het juiste isolatiemateriaal." *Monument en Duurzaamheid*, 2023.
- Tijskens, A., Janssen, H., and Roels, S. 2017. "Retrofitting Historical Buildings: A Probabilistic Assessment of Interior Insulation Measures." *Proceedings of the 4th WTA International PhD Symposium*, 149–56.
- Vereecken, E., and Roels, S. 2016. "Capillary Active Interior Insulation Systems for Wall Retrofitting: A More Nuanced Story." *International Journal of Architectural Heritage* 10 (5): 558–69. <https://doi.org/10.1080/15583058.2015.1009575>.
- Vereecken, E., and Roels, S. 2014. "A Comparison of the Hygric Performance of Interior Insulation Systems: A Hot Box–Cold Box Experiment." *Energy and Buildings* 80 (September):37–44. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.033>.
- Vereecken, E., en Roels, S. 2023. "Traditionele versus meer recente binnenisolatiesystemen: pros en cons." *Duurzaam behoud van massief baksteenmetselwerk*, 2023.

Vereecken, E., Van Gelder, L., Janssen, H., and Roels, S. 2015. "Interior Insulation for Wall Retrofitting – A Probabilistic Analysis of Energy Savings and Hygrothermal Risks." *Energy and Buildings* 89 (February):231–44. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.031>.

KARAKTERISERING VAN HISTORISCHE BAKSTENEN OP BASIS VAN LABORATORIUMMETINGEN

Staf Roels, KU Leuven

Samenvatting

Een betrouwbare energetische renovatie van historische gebouwen vraagt een gedegen kennis van de bestaande geveldelen om zeker geen schade te initiëren na een isolatie-ingreep. Daarom is binnen het onderzoeksproject 'Energetische prestaties van massieve baksteengevels in woonhuismonumenten' ook geprobeerd om een beeld te krijgen van de belangrijkste warmte- en vochteigenschappen van bakstenen die we typisch terugvinden in Nederlandse historische gebouwen. In totaal zijn meer dan 100 verschillende historische bakstenen verzameld uit gebouwen opgericht tussen 1500 en 1950. Deze bakstenen zijn in het labo van de KU Leuven onderworpen aan verschillende testen om hun dichtheid, capillair vochtgehalte, warmtetransporteigenschappen e.d. te bepalen. Uit de labo-metingen blijkt dat er een duidelijk verband bestaat tussen dichtheid en porositeit wat wijst op een gelijkaardige mineralogische samenstelling van alle gebakken kleistenen die we onderzocht hebben. Ook het capillair en verzadigingsvochtgehalte toont een duidelijke correlatie met de dichtheid. Voor de andere materiaaleigenschappen zijn de correlaties minder duidelijk.

1. Inleiding

Onder impuls van de klimaatsverandering en de Europese Green Deal zal het gebouwenbestand in Europa op korte termijn grondig energetisch gerenoveerd moeten worden. In de meeste Europese landen dateren veel van onze woongebouwen van voor de eerste energiecrisis, begin jaren '70 van de vorige eeuw. Bovendien hebben deze gebouwen vaak erfgoedwaarde en is het niet eenvoudig om de bestaande, meestal massieve metselwerkwanden thermisch te verbeteren. Om inzicht te krijgen in de huidige toestand en zowel het potentieel van energiebesparingen te kunnen inschatten, als de eventuele risico's die daarmee gepaard kunnen gaan, is het belangrijk om een beter zicht te krijgen op de hygrothermische eigenschappen van de gebruikte materialen. In het kader van het onderzoeksproject zijn van iets meer dan 56 historische monumenten 100 baksteenmonsters verzameld waarvan de warmte- en vochteigenschappen gekarakteriseerd werden in het labo. Daarbij zijn vooral verbanden gezocht tussen de belangrijkste hygrothermische eigenschappen en de dichtheid van de bakstenen. Kennis over mogelijke verbanden tussen dichtheid en andere eigenschappen kan erg waardevol zijn voor de karakterisatie van bakstenen van andere monumenten omdat het een idee kan geven van de belangrijkste eigenschappen op basis van een eenvoudige test, die weinig en relatief kleine testmonsters vraagt.

2. Karakterisatie van historische bakstenen via labo-metingen

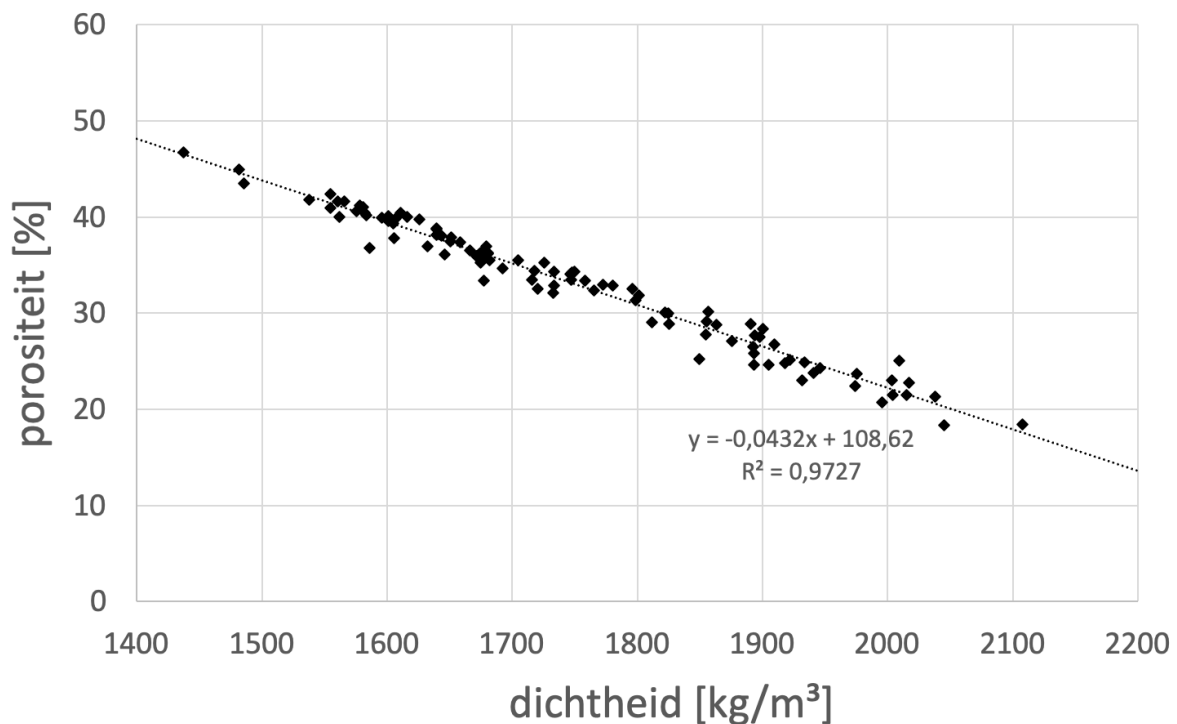
De hygrothermische prestaties van iets meer dan 100 historische bakstenen zijn opgemeten. De meeste monsters zijn verzameld bij conservatieprojecten van historische gebouwen, vooral woongebouwen daterend van de 16^{de} tot de 20^{ste} eeuw. Op alle monsters is een vacuümverzadigingsproef uitgevoerd. Opzuigproeven ter bepaling van het capillair vochtgehalte en de capillaire absorptiecoëfficiënt zijn gebeurd op 95 van de 101 monsters. De thermische geleidbaarheid is gemeten op 85 verschillende bakstenen.

2.1. Verband tussen porositeit en dichtheid

Dichtheid en porositeit zijn opgemeten op basis van vacuümverzadigingsproeven en onderwatermetingen. Voor elk baksteenmonster geeft onderstaande vergelijking het verband tussen de dichtheid ρ in kg/m^3 , de porositeit Ψ_o (%) en matrixdichtheid of dichtheid van het basismateriaal waaruit de baksteen is opgebouwd ρ_s (kg/m^3):

$$\rho = (1 - \Psi_o) \cdot \rho_s \quad (1)$$

Figuur 1 toont dat er een sterk verband bestaat tussen de gemeten porositeit en de dichtheid van de bakstenen. Dit wijst erop dat de historische gebakken kleistenen uit Nederland allemaal een erg gelijkaardige mineralogische samenstelling hebben, wat toelaat om vergelijking (1) ook toe te passen op alle monsters samen, met de matrixdichtheid als te fitten eigenschap. Op basis van de gefitte rechte door alle meetpunten vinden we een gemiddelde matrixdichtheid van 2610 kg/m^3 . Een gelijkaardige oefening is ook gebeurd door Hall en Hamilton die voor Britse bakstenen een gemiddelde matrixdensiteit van 2680 kg/m^3 bekwamen en voor Italiaanse bakstenen twee deelgroepen onderscheidden: een groep met matrixdensiteit van 2750 kg/m^3 en een groep met een matrixdensiteit van 2600 kg/m^3 [1]. Deze laatste waarde is erg in lijn met de matrixdensiteit die we terugvinden voor de Nederlandse bakstenen.

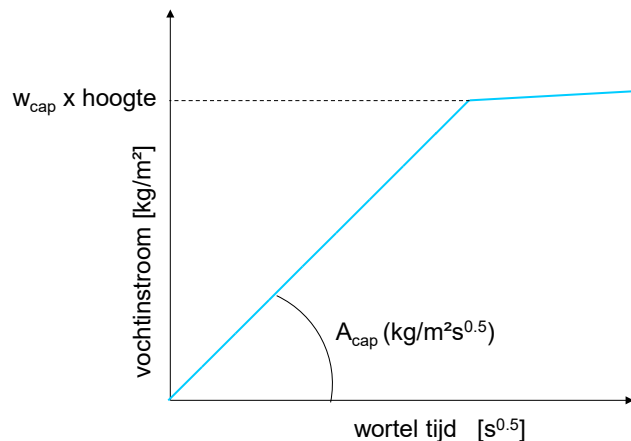
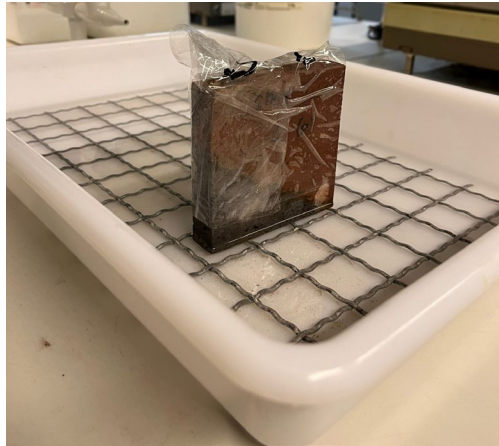


Figuur 1: Porositeit als functie van de dichtheid opgemeten op 101 verschillende Nederlandse historische bakstenen. Het lineair verband tussen beide materiaaleigenschappen duidt op een gelijkaardige mineralogische samenstelling van de historische bakstenen. Een fit door alle datapunten geeft een gemiddelde matrixdensiteit van 2610 kg/m^3 .

2.2. Capillaire eigenschappen

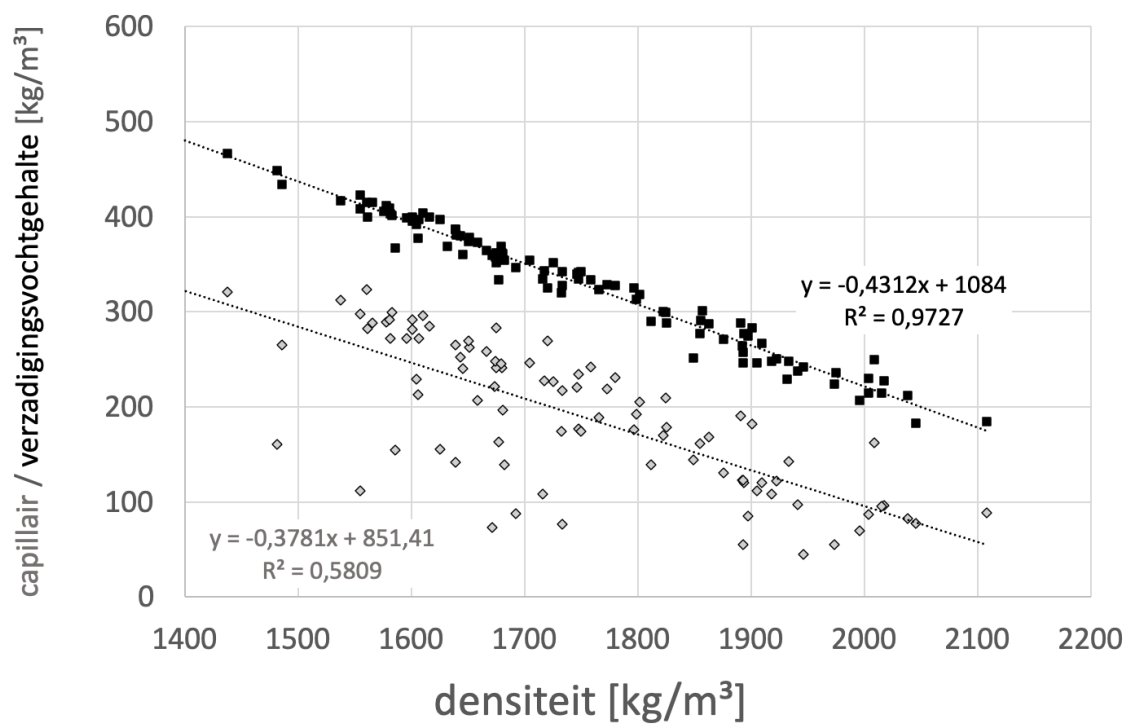
Capillaire opzuigproeven zijn uitgevoerd in overeenstemming met de procedure beschreven in het round-robin experiment uitgevoerd binnen het Europese HAMSTAD-project [2]. Bij een

capillaire opzuigproef wordt één zijde van een droog proefmonster in contact gebracht met water, waarbij het proefmonster via capillaire werking water zal opzuigen. Voor de meeste bakstenen vertoont de hoeveelheid opgezogen water een lineair verband met de wortel van de tijd (zie Figuur 2), wat uitgedrukt wordt in de capillaire absorptiecoëfficiënt. Het evenwichtsvochtgehalte dat na verloop van tijd bereikt wordt (het zogenaamde capillair vochtgehalte) is typisch lager dan het verzadigingsvochtgehalte van het monster.

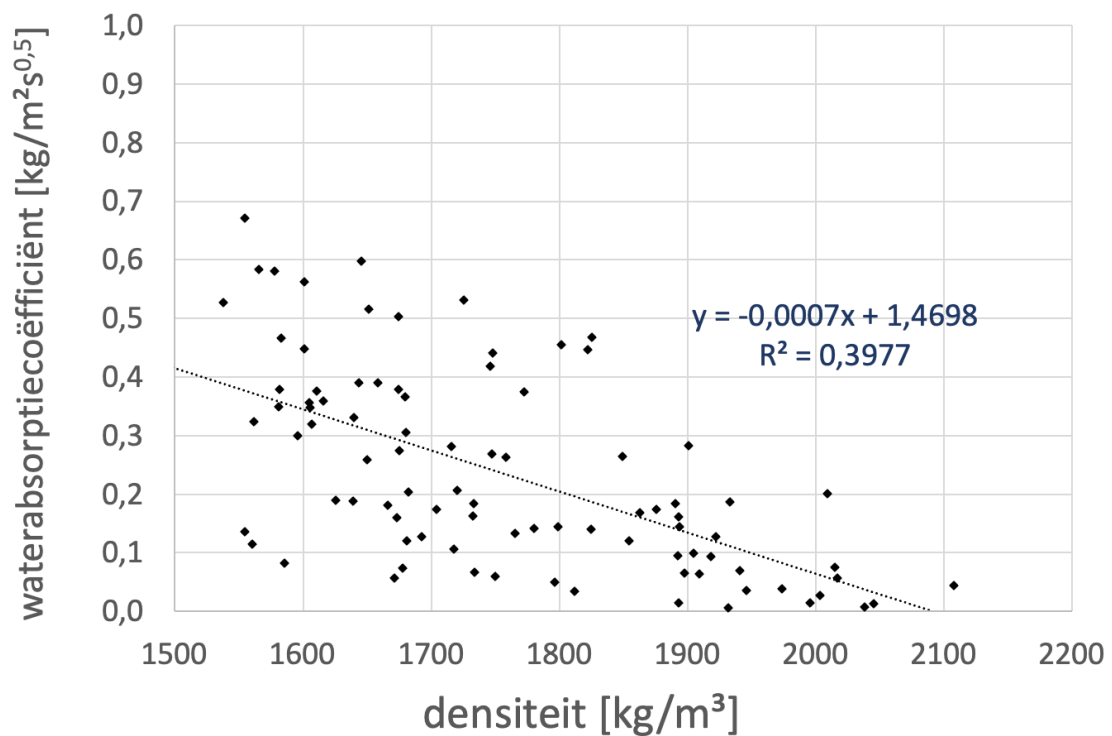


Figuur 2: Capillaire opzuigproef: een droog monster wordt met één zijde in contact gebracht met water (links). Wanneer de opgenomen hoeveelheid water wordt uitgezet als functie van de wortel van de tijd (rechts) krijgt men voor de meeste bouwmaterialen een lineair verband waarbij de helling de capillaire absorptiecoëfficiënt A voorstelt en uit het knikpunt van de curve het capillair vochtgehalte bepaald wordt.

In onderstaande Figuur 3 en 4 zijn enerzijds het capillair vochtgehalte (kg/m^3) en anderzijds de capillaire absorptiecoëfficiënt ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})$) weergegeven in functie van de dichtheid van de baksteen. In Figuur 3 is ter vergelijking ook het verzadigingsvochtgehalte (kg/m^3) weergegeven. Het erg duidelijke verband dat terug te vinden was voor de porositeit en nu weergegeven voor het verzadigingsvochtgehalte, wordt iets minder uitgesproken als men kijkt naar het capillair vochtgehalte. Niettemin is ook hier een duidelijke relatie terug te vinden tussen dichtheid en capillair vochtgehalte. Dit verband lijkt nagenoeg verdwenen als men de absorptiecoëfficiënt als functie van de dichtheid uitzet. Gemiddeld genomen kan men stellen dat bakstenen met lage dichtheid een hogere absorptiecoëfficiënt hebben, maar de correlatie tussen beide materiaaleigenschappen is erg beperkt. Belangrijke voetnoot bij beide grafieken is dat de historie van de bakstenen met betrekking tot mogelijke vroegere behandeling zoals bv. een vroeger aangebrachte hydrofobering, vaak niet gekend is, wat mogelijks de uitschieters in capillair vochtgehalte en de soms erg lage waarden in absorptiecoëfficiënt zou kunnen verklaren.



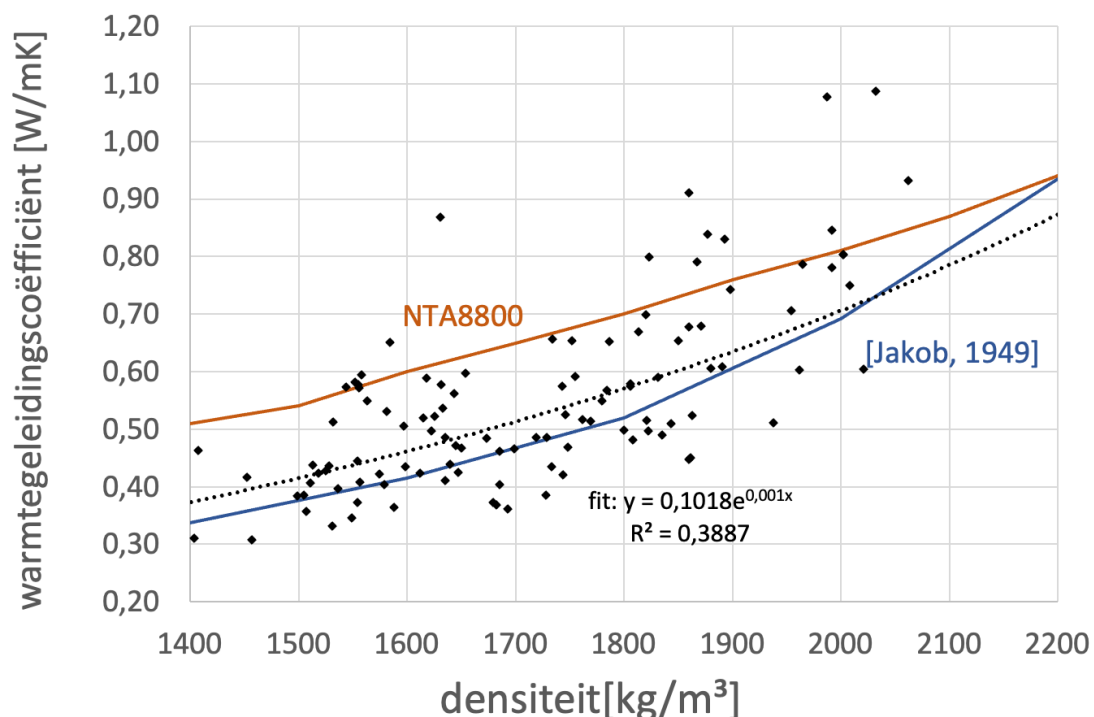
Figuur 3: Capillair en verzadigingsvochtgehalte uitgezet in functie van de dichtheid. De ruitjes tonen het capillair vochtgehalte, de vierkantjes het verzadigingsvochtgehalte.



Figuur 4: Capillaire absorptiecoëfficiënt als functie van de dichtheid. Er is geen duidelijk verband waarneembaar.

2.3. Thermische geleidbaarheid

De thermische geleidbaarheid in droge toestand (W/mK) van de baksteenmonsters is opgemeten volgens de gecontroleerde warmtestroommethode. Bij deze methode wordt een vlak monsters geplaatst tussen twee isotherme platen op een verschillende temperatuur. Aan beide zijden tussen monster en isotherme plaat zit centraal een cirkelvormige warmtestroommeter ingebed in een laag neopreen met dezelfde dikte en warmtegeleidingscoëfficiënt als de warmtestroommeter. Op dezelfde posities worden extreem dunne Cu/Co thermokoppels gekleefd. Zodra stationaire condities worden bereikt, wordt de warmtestroom door het monster gemeten. Indien uitgegaan wordt van een 1D-probleem kan uit de gemeten warmtestroom en het opgelegde temperatuurverschil de warmteweerstand van het monster en bij homogene isotrope monsters de warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal bepaald worden. Voor het project werd de testopstelling specifiek aangepast om de eerder kleine baksteenmonsters van ongeveer 8 bij 8 cm, nauwkeurig te kunnen opmeten. Figuur 5 hieronder geeft de opgemeten warmtegeleidingscoëfficiënt weer (droog monster en op 10°C), opnieuw in functie van de dichtheid. Zoals te verwachten stijgt de warmtegeleidingscoëfficiënt met toenemende dichtheid. Ter vergelijking is ook de curve overeenkomstig de richtwaarden van NTA8800 (rode lijn) [3] en een van de oudste in de literatuur terug te vinden niet-lineaire verbanden voor bouwmaterialen [4] weergegeven.



Figuur 5: Warmtegeleidingscoëfficiënt als functie van de dichtheid. De rode lijn geeft de normwaarden overeenkomstig NTA8800 [3] weer en de blauwe lijn komt overeen met een van de oudste voorgestelde verbanden voor bouwmaterialen terug te vinden in de literatuur [4].

3. Besluit

Uit de karakterisatie van de historische bakstenen blijkt een duidelijk verband tussen de porositeit en dichtheid, wat aantoont dat de meeste historische bakstenen uit Nederland een vergelijkbare mineralogische samenstelling hebben. Ook het capillair vochtgehalte bleek sterk gecorreleerd met de dichtheid. Het verband was veel minder uitgesproken voor de

capillaire absorptiecoëfficiënt en de warmtegeleidingscoëfficiënt van de verschillende bakstenen. Globaal geldt wel dat een hogere dichtheid overeenkomt met een lagere waterabsorptiecoëfficiënt en een hogere warmtegeleidingscoëfficiënt. De bekomen warmtegeleidingscoëfficiënten liggen typisch lager dan de richtwaarden van NTA8800.

Op basis van deze meetresultaten, kan volgende procedure voorgesteld worden om een eerste idee te hebben van de baksteeneigenschappen als er voor een renovatieproject geen enkele informatie over de toegepaste bakstenen voorhanden is:

- Reinig één of meerdere stenen en bepaal zo goed als mogelijk het gewicht en het volume (lengte x breedte x hoogte) en daaruit de **dichtheid** (=gewicht in kg / volume in m³)
- De porositeit van de steen (in % poriën) kan dan nauwkeurig ingeschat worden als **100 – dichtheid/2610**
- Het maximale vochtgehalte (in kg/m³) dat de steen kan bevatten is gelijk aan de **porositeit x 10**
- Het capillair vochtgehalte (in kg/m³) kan relatief goed benaderd worden als **1100-dichtheid/2**
- Voor de waterabsorptiecoëfficiënt en de warmtegeleidingscoëfficiënt kan op basis van de gekende dichtheid in combinatie met figuren 4 en 5 een ruwe inschatting gemaakt worden

TAKE-AWAYS

- Op basis van het gewicht en volume van een historische baksteen kan de porositeit nauwkeurig worden ingeschat. Hieruit kan ook het maximale vochtgehalte worden bepaald en het capillair vochtgehalte relatief goed benaderd worden.
- Op basis van de dichtheid van een historische baksteen kan een ruwe inschatting worden gemaakt van de waterabsorptiecoëfficiënt en de warmtegeleidingscoëfficiënt.
- De gemeten warmtegeleidingscoëfficiënten van historische bakstenen liggen typisch lager dan de richtwaarden van NTA8800.

4. Referenties

- [1] C. Hall en A. Hamilton, 2015. Porosity-density relations in stone and brick materials. *Materials and Structures* 48:1265-1271. DOI: 10.1617/s11527-013-0231-1
- [2] Roels e.a., 2004. Interlaboratory comparison of hygric properties of porous building materials. *Journal of Therm. Env. and Build. Sc.* 27(4) 307-325
- [3] NTA 8800, 2023. Energy performance of buildings - Determination method.
- [4] Jakob M., 1949. Heat transfer, Volume 1.

PRAKTIJKMETINGEN VAN DE THERMISCHE PRESTATIE EN LUCHTDICHTHEID IN MONUMENTALE WONINGEN

Zara Huijbregts, TU Delft

Samenvatting

Om de energieverliezen door transmissie en infiltratie in monumentale woningen met massieve baksteengevels beter in kaart te brengen zijn praktijkmetingen uitgevoerd van de thermische prestatie en luchtdichtheid in 38 casussen in Nederland. De warmteweerstand van 34 historische baksteengevels is gemeten en vergeleken met theoretische rekenwaardes op basis van de huidige norm NTA 8800. Daarnaast is de luchtdichtheid gemeten in 16 monumentale woningen en zijn de grootste luchtlekken in kaart gebracht. De resultaten laten zien dat de warmteweerstand van historische baksteengevels sterk varieert en vaak hoger ligt dan theoretische rekenwaardes. De luchtdichtheid in alle onderzochte woningen is laag en maatgevende luchtlekken bevinden zich met name bij dak- en kozijnaansluitingen en rookkanalen. Bij het aanbrengen van binnenisolatie is een zorgvuldige uitvoering en detaillering van belang om de luchtdichtheid te verbeteren.

1. Inleiding

Monumentale woningen met massieve baksteengevels hebben vaak een hoog energieverbruik voor verwarming doordat de woningen beperkt of vrijwel niet zijn voorzien van isolatie en kierdichting. Omdat veel monumenteigenaren de wens hebben om hun woning te verduurzamen, is het van belang dat de verduurzamingsmaatregelen zorgvuldig worden gekozen op basis van de verwachte energiebesparing, het verbeterde comfort en het behoud van cultuurhistorische waarden. De thermische prestatie en luchtdichtheid van monumentale woningen zijn echter lastig in te schatten met de huidige bepalingsmethodes voor energieprestaties, zoals de NTA 8800 [1], omdat deze methodes zijn ontwikkeld voor nieuwbouwconstructies. Om meer inzicht te krijgen in de werkelijke thermische prestatie van monumentale baksteengevels en luchtdichtheid van monumentale woningen zijn voor dit onderzoek praktijkmetingen uitgevoerd in een groot aantal casussen. De gemeten waarden worden vergeleken met genormeerde waarden om de energieprestatie van monumentale woningen nauwkeuriger te voorspellen en de aanpak voor verduurzaming te verbeteren.

1.1 Onderzoek thermische prestatie historische gevels

Bij een verwarmde woning treedt warmteverlies op door transmissie van binnen naar buiten, via de gebouwschil, en door ventilatie en infiltratie, via luchtuitwisseling met buitenlucht. In oude, slecht geïsoleerde woningen wordt het totale warmteverlies voor ongeveer 80% bepaald door transmissie en voor 20% door ventilatie en infiltratie [2]. Onder de thermische prestatie van een gevel wordt in dit onderzoek de warmteweerstand (R_c -waarde) van de gevel verstaan. In internationale onderzoeken wordt in plaats van de R_c -waarde vaak de U -waarde, de warmtedoorgangscoefficiënt gehanteerd. Aan de hand van de R_c - of U -waarde van de scheidingsconstructies, de compactheid van het gebouw en het ventilatietype kan een inschatting worden gemaakt van het energieverbruik voor verwarming in het stookseizoen.

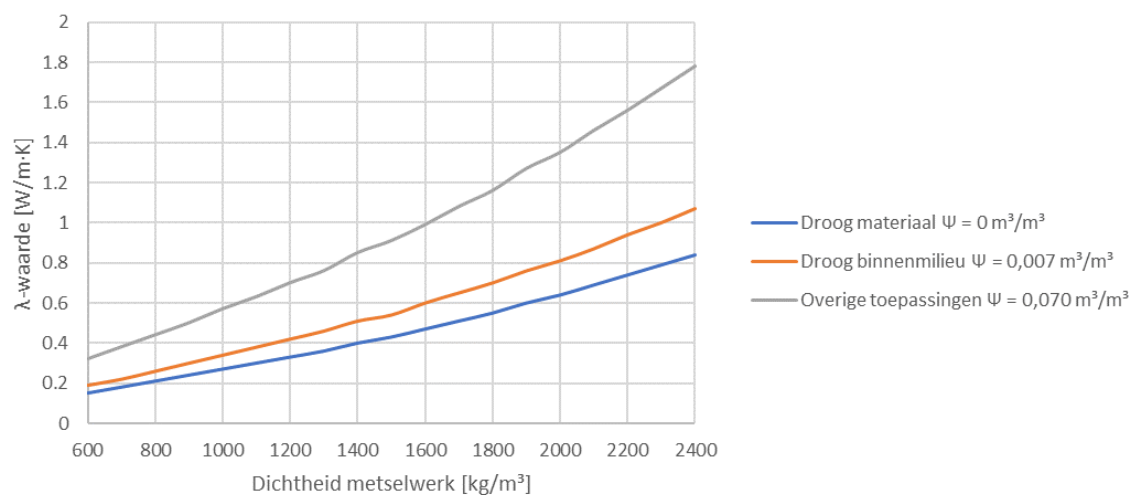
Eén van de aanleidingen voor het huidige onderzoek naar de thermische prestatie van monumentale massieve baksteengevels zijn bevindingen uit vergelijkbare internationale onderzoeken. Een Brits onderzoek waarin de warmteweerstand van 34 gevels met

verschillende traditionele gevelopbouw werd gemeten en vergeleken met theoretische waarden toonde aan dat in 77% van de gevallen de gemeten warmteweerstand hoger lag dan de theoretische warmteweerstand [3]. In een ander onderzoek waarbij de thermische prestatie van een aantal monumentale baksteengevels in Italië werd gemeten lagen de gemeten warmteweerstanden eveneens hoger dan voorspeld op basis van theoretische waarden. Dit werd verklaard doordat historische bakstenen een lagere dichtheid hebben dan moderne, industrieel vervaardigde bakstenen door een andere samenstelling van de klei [4]. Wel kunnen beschadigingen aan de bakstenen de thermische prestatie verslechteren [5]. Bij dikke baksteengevels is het mogelijk dat tussen het metselwerk andere materialen zijn toegepast, zoals kleine stenen of andere ruwe materialen. Deze materialen beïnvloeden de warmteweerstand van de gevel omdat ze een lagere isolatiewaarde hebben dan baksteen [5].

Indien de warmteweerstand van een monumentale gevel niet goed wordt ingeschat, is het mogelijk dat bij het selecteren van verduurzamingsmaatregelen verkeerde prioriteiten worden gesteld. Dit kan bijdragen aan een onder- of overschatting van het energieverbruik van het gebouw en de benodigde hoeveelheid na-isolatie.

1.2 Theoretische rekenwaardes metselwerk

De theoretische warmteweerstand van metselwerk kan worden bepaald op basis van NTA8800 [1] en [6]. Deze richtlijnen geven de warmtegeleidingscoëfficiënt (λ -waarde) van het in Nederland meest toegepaste type baksteenmetselstenen met inbegrip van in het metselwerk opgenomen voegen, afhankelijk van de dichtheid. Omdat de warmtegeleidingscoëfficiënt afhankelijk is van het vochtgehalte, bevat de norm λ -waarden voor een droog materiaal (vochtgehalte baksteen $0 \text{ m}^3/\text{m}^3$), droog binnenmilieu (vochtgehalte baksteen $0,007 \text{ m}^3/\text{m}^3$) en voor overige toepassingen (vochtgehalte baksteen $0,070 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Figuur 1 toont de λ -waardes uitgezet tegen de dichtheid van het metselwerk.



Figuur 1: Warmtegeleidingscoëfficiënt van metselwerk, inclusief voegen, afhankelijk van de dichtheid en het vochtgehalte.

1.3 Onderzoek luchtdichtheid

Luchtstroming van buiten naar binnen door de gebouwschil treedt op twee manieren op: (1) gewenste en controleerbare luchtstroming door ventilatie, bijvoorbeeld via ventilatieroosters; (2) ongewenste en niet controleerbare luchtstroming door infiltratie, via naden, kieren en openingen in de gebouwschil. De luchtdichtheid van de gevel geeft de luchtstroming door de

gebouwschil weer via 'onbedoelde' luchtlekken. Gewenste luchtuitwisseling, via bijvoorbeeld ventilatieroosters, wordt niet meegenomen in de bepaling van de luchtdichtheid.

In monumentale woningen met massieve baksteengevels is de luchtdichtheid doorgaans laag door het ontbreken van isolatie en kierdichting. Gewoonlijk zijn er geen voorzieningen opgenomen voor gewenste luchtuitwisseling, maar wordt de woning volledig natuurlijk geventileerd via luchtlekken door naden, kieren en openingen. Deze luchtlekken dragen bij aan een hoog energieverlies en kunnen leiden tot comfortklachten.

Luchtlekken kunnen ontstaan wanneer bouwdelen niet goed op elkaar aansluiten, bij het maken van doorvoeren, of wanneer er poreuze bouwmaterialen worden toegepast. Daarnaast kunnen klimaat- en werkomstandigheden tijdens de bouw luchtlekken veroorzaken, bijvoorbeeld wanneer houten delen zijn uitgezet tijdens de plaatsing en krimpen wanneer na oplevering de temperatuur in de woning stijgt. Verder kan de luchtdichtheid van een woning per seizoen variëren: onderzoek van TNO naar de invloed van seizoenseffecten liet zien dat in veel woningen de gemeten luchtdichtheid afneemt in de winter in vergelijking met de zomer, herfst en winter [7]. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door een toename van vervorming (uitzetting of krimp) van geveldelen in het stookseizoen.

Eerder onderzoek toonde aan dat bij woningen gebouwd na 1920, toen de gemetselde spouwmuur werd geïntroduceerd en schuiframen minder werden toegepast, een lagere luchtdichtheid werd gemeten ten opzichte van oudere woningen met massieve baksteengevels [8]. Vanaf omstreeks 1980 verbeterde de luchtdichtheid van woningen door het toepassen van energiebesparende maatregelen, zoals kierdichtingsprofielen, en vermindering van het aantal schoorstenen.

Verskillende internationale studies hebben meetonderzoeken uitgevoerd naar de luchtdichtheid van historische woningen. Een overzicht van het gemiddelde infiltratievoud of de gemiddelde lucht volumestroom per m² geveloppervlak bij een referentiedrukverschil van 50 Pa is gegeven in Tabel 1. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de casussen verschillen qua gevelopbouw, gebruiksfunctie en mate van verduurzamingsmaatregelen.

Tabel 1: Vergelijking luchtdichtheid in monumentale gebouwen uit internationale studies.

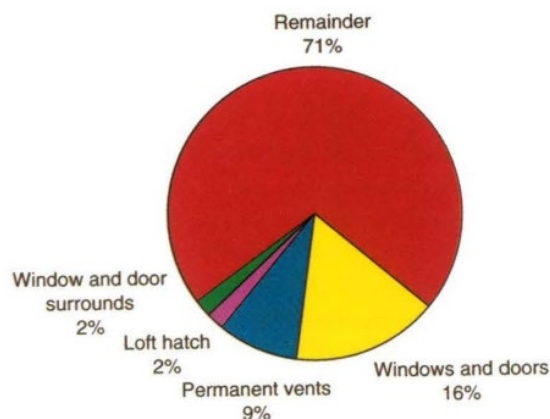
Bouw- periode	Land	Gevelopbouw	n_{50} [h ⁻¹]	q_{50} [m ³ /(h·m ²)]	Aantal casus- sen	Referentie
Voor 1900	Verenigd Koninkrijk	Grotendeels massief metselwerk	12		23	[8]
1882 - 1919	Spanje	Massief metselwerk of kalkzandsteen	9.0	7.0	37	[9]
1650 - 1929	Zweden	Grotendeels kalkzandsteen, enkele woningen met houten gevels		17.4	11	[10]

1.4 Analyse luchtlekken

Infiltratieverliezen via specifieke luchtlekken kunnen worden gemeten door, na een nulmeting, het luchtlek af te dichten tijdens de bepaling van de luchtdichtheid.

Meetonderzoek van de Building Research Establishment (BRE) in het Verenigd Koninkrijk in 500 woningen liet zien dat ca. 71% van de luchtlekken lastig te herleiden zijn omdat deze niet afgedicht kunnen worden (Figuur 2). Deze lekken treden voornamelijk op ter plaatse van scheuren in constructiedelen en aansluitingen tussen bouwdeelen [8]. Onderstaand overzicht geeft een indicatie van de impact van specifieke luchtlekken afkomstig uit het BRE-

onderzoek. Hierbij is het van belang dat het onderzoek betrekking heeft op alle woningtypes in het Verenigd Koninkrijk, waarvan een beperkt aantal woningen gebouwd vóór 1900.



Figuur 2: Bijdrage van specifieke luchtlekken aan de totale luchtdichtheid in woningen gemeten in het BRE-onderzoek [8].

2. Meetmethodes

In het onderzoek worden de warmteweerstand van monumentale baksteengevels en de luchtdichtheid van woonhuismonumenten in Nederland experimenteel bepaald volgens genormeerde meetmethoden. De volgende paragrafen beschrijven de toegepaste meetmethoden. Vervolgens worden de meetresultaten vergeleken met theoretische rekenwaarden en waarden afkomstig uit de literatuur, zoals beschreven in het vorige hoofdstuk. Daarnaast worden de onderzochte gevels gecategoriseerd op visuele kenmerken om een vergelijking te maken tussen het type baksteen en de gemeten eigenschappen.

2.1 Bepaling warmteweerstand

Wanneer van een materiaal de dikte en warmtegeleidingscoëfficiënt bekend zijn, kan de warmteweerstand R door het materiaal worden berekend met de volgende formule:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [\text{Formule 1}]$$

Met:

R = warmteweerstand [$\text{m}^2\text{K/W}$]

d = materiaaldikte [m]

λ = warmtegeleidingscoëfficiënt [$\text{W/m}\cdot\text{K}$]

Daarnaast kan de warmteweerstand R worden bepaald uit het verschil in oppervlaktetemperatuur aan beide zijdes van het materiaal, gedeeld door de warmtestroomdichtheid door het materiaal:

$$R = \frac{T_{si} - T_{se}}{q} \quad [\text{Formule 2}]$$

Met:

T_{si} = oppervlaktetemperatuur binnenzijde [$^{\circ}\text{C}$]

T_{se} = oppervlaktetemperatuur buitenzijde [$^{\circ}\text{C}$]

q = warmtestroomdichtheid [W/m^2]

Indien de gevel is opgebouwd uit meerdere constructielagen (binnenspouwblad, luchtspouw, buitenspouwblad, afwerkklagen) wordt gesproken van de R_c -waarde van de gevel. Dit is de warmteweerstand van de totale scheidingsconstructie: de som van de warmteweerstand van de afzonderlijke lagen. Door onregelmatigheden in de gevelconstructie, bijvoorbeeld ter plaatse van een koudebrug of een luchtstroming in een spouw, kan de R_c -waarde in de praktijk afwijken van de theoretische R_c -waarde.

2.1.1 Genormeerde meetmethode NEN-ISO 9869 ('Average method')

Voor een nauwkeurige bepaling van de warmteweerstand van de gevel worden de metingen in dit onderzoek uitgevoerd conform de Internationale norm NEN-ISO 9869-1 Thermische isolatie - Bouwelementen – In-situ metingen van warmteweerstand en warmtedoorlatendheid - Deel 1: Warmtestroommeter methode [11]. De warmtestroommeter methode is gebaseerd op formule [2]. De voorgeschreven meetmethode in NEN-ISO 9869-1 bestaat uit een warmtestroommeting aan de binnenzijde van de gevel, in combinatie met metingen van de oppervlaktetemperaturen aan de binnen- en buitenzijde van de gevel.

Vanwege veranderingen in het buiten- en binnenklimaat variëren de temperatuurgradiënt over een gevel en het materiaalvochtgehalte van het metselwerk over de tijd. Daarnaast zorgt de thermische massa van de gevel ervoor dat warmte wordt vastgehouden. Om de effecten van variaties in de warmtestroomdichtheid en thermische massa uit te middelen, dient de meetperiode lang genoeg te zijn. De warmteweerstand R wordt berekend uit de voortschrijdend gemiddelde waarden van het temperatuurverschil en de warmtestroomdichtheid met de volgende formule:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{si,j} - T_{se,j})}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad \text{[Formule 3]}$$

Met:

$T_{si,j}$ = oppervlaktetemperatuur binnenzijde op tijdsinterval j [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{se,j}$ = oppervlaktetemperatuur buitenzijde op tijdsinterval j [$^{\circ}\text{C}$]

q_j = warmtestroomdichtheid op tijdsinterval j [W/m^2]

n = het totaal aantal tijdsintervallen [-]

Deze methode staat internationaal bekend als de ISO 9869 Average method. In deze rapportage wordt deze methode beschreven als 'genormeerde meetmethode'. Bij de berekening van de R_c -waarde vallen de eerste 24 uur van de meetperiode buiten beschouwing. Als de temperatuur ter plaatse van de warmtestroommeter stabiel is, is de minimale meetperiode 72 uur (3 dagen) voor een constructie met een lage thermische massa en 96 uur voor een constructie met een hoge thermische massa. Conform de norm is de R_c -waarde voldoende geconvergeerd indien gedurende een periode van drie dagen de R_c -waarde niet meer dan 5% afwijkt van de R_c -waarde 24 uur eerder.

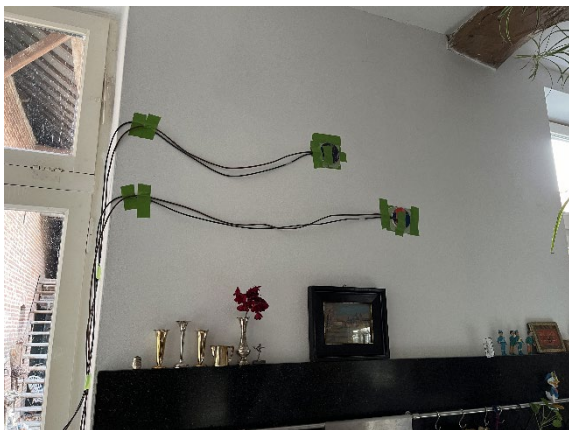
Grote temperatuurgradiënten over de gevels vergroten de nauwkeurigheid van de metingen [12]. De temperatuurgradiënt tussen binnen en buiten is bij voorkeur groter dan 10°C [13], bij een temperatuurgradiënt lager dan 3°C is de meting onbetrouwbaar [14]. Om de minimaal vereiste temperatuurgradiënt te behalen wordt de in-situ warmteweerstand bij voorkeur gemeten in de winterperiode en is het niet mogelijk om de warmteweerstand van een gevel te bepalen wanneer deze grenst aan een onverwarmde ruimte.

Zoals voorgeschreven in de norm wordt de warmtestroomdichtheid gemeten op enige afstand van radiatoren, ramen en vloeren om ongewenste invloeden van warmtebronnen en -lekken te voorkomen. Aan de buitenzijde dient de warmtestroomsensor te worden afgeschermd van zonnestraling en reflecties. De oppervlaktetemperatuur wordt gemeten

aan de binnen- en buitenzijde van de gevel in de nabijheid van de warmtestroomsensor. Alle meetwaarden worden geregistreerd met een tijdsinterval van 10 minuten.

2.2 Meetapparatuur

Voor de bepaling van de warmteweerstand wordt per meetpositie één warmtestroomsensor (Hukseflux HFP01) bevestigd aan de binnenzijde van de gevel. De Hukseflux warmtestroomsensor bestaat uit een thermozuil, een aantal in serie geschakelde thermokoppels, in een kunststof behuizing met een zeer lage warmteweerstand. Daarnaast worden twee thermokoppels type T bevestigd aan de binnen- en buitenzijde van de gevel nabij de warmtestroomsensor. De thermokoppels en warmtestroommeters zijn aangesloten op transmitters. Deze transmitters zenden de meetwaarden via een draadloze verbinding naar een centraal opgestelde datalogger in de woning. De warmtestroomsensoren zijn eind 2019 gekalibreerd en hebben een onzekerheid in kalibratie van $\pm 3\%$. De thermokoppels hebben een meetonzekerheid van $0,5^\circ\text{C}$. Bij warmtestroommetingen dient rekening te worden gehouden met een onnauwkeurigheid van ca. 10%, veroorzaakt door onzekerheden in de kalibratie van de warmtestroomsensoren of thermokoppels. Ook dunne (isolerende) luchtlagen, die kunnen ontstaan tussen de sensoren en de gevel wanneer de sensoren worden bevestigd op ruwe oppervlaktes, beïnvloeden de onnauwkeurigheid van de meting. Voorbeelden van de meetopstelling aan de binnen- en buitenzijde van de gevel zijn gegeven in Figuur 3 en Figuur 4.



Figuur 3: Oppervlaktetemperatuur- en warmtestroomsensoren aan de binnenzijde van de gevel.



Figuur 4: Oppervlaktetemperatuursensoren aan de buitenzijde van de gevel.

2.3 Bepaling luchtdichtheid

Hoewel in de praktijk meestal de term 'luchtdichtheid' wordt gehanteerd, gebruiken het Nederlandse Bouwbesluit en de Nederlandse en internationale normen de term 'luchtdoorlatendheid'. Beide termen geven de lekvolumestroom aan, maar hebben een tegengestelde duiding [15]. In deze rapportage wordt de term 'luchtdoorlatendheid' gebruikt wanneer er wordt verwezen naar de normen.

2.3.1 Meetmethode

De genormeerde bepaling van de luchtdoorlatendheid van gebouwen met behulp van de overdrukmethode is beschreven in [16]. Bij de overdrukmethode wordt gebruik gemaakt van een 'blower door', een hulpconstructie met een ventilator die op de plaats van een deur of raam in het kozijn wordt geplaatst, en een luchtvolumestroommeter. Met behulp van de

ventilator wordt de woning op over- of onderdruk gebracht tot een minimaal drukverschil van 50 Pa en wordt de luchtvolumestroom gemeten. Om de nauwkeurigheid van de resultaten te vergroten wordt een maximaal drukverschil van 100 Pa aangeraden. Vervolgens wordt het drukverschil stapsgewijs met maximaal 10 Pa verlaagd en wordt bij iedere stap de luchtvolumestroom afgelezen. De luchtdoorlatendheid in de overdruksituatie kan sterk afwijken van de luchtdoorlatendheid in de onderdruksituatie, bijvoorbeeld doordat kieren bij naar buiten toe te openen ramen toenemen wanneer een woning op overdruk staat. Daarom wordt zowel voor de onder- als overdruksituatie een regressielijn afgeleid uit de druk/volumestroomkarakteristiek, waarna een gemiddelde luchtdoorlatendheid wordt bepaald.

Het drukverschil over de gevel wordt veroorzaakt door winddruk en thermische trek, waarbij de winddruk meestal de grootste drijvende kracht is [15]. Bij het meten volgens de overdrukmethode is het daarom van belang dat de windsnelheid niet te hoog is, omdat dit de winddruk verhoogt. Onder windstille condities is de meetonzekerheid meestal lager dan 10%, terwijl bij hoge windsnelheden de meetonzekerheid kan oplopen tot $\pm 20\%$ [17].

De luchtvolumestroom q_{pr} , bij een referentiedrukverschil Δp_r uitgedrukt in m^3/h , door openingen in de gebouwschil hangt af van de aard van de stroming en wordt uitgedrukt met een machtsvergelijking:

$$q_{pr} = C_l (\Delta p_r)^n \quad [\text{Formule 4}]$$

Met:

C_l = gesommeerde luchtdoorlatendheidscoëfficiënt van de openingen [$\text{dm}^3/\text{s} \cdot \text{Pa}^n$]

Δp_r = referentiedrukverschil

n = stromingsexponent [h^{-1}]

De stromingsexponent (n [-]) geeft de turbulentie van de stroming aan ter plaatse van de opening. Bij een volledige turbulente stroming geldt $n = 0,5$ en bij een volledig laminaire stroming geldt $n = 1$. Uit metingen bij een drukverschil van 50 Pa en 10 Pa kan de stromingsexponent worden bepaald met de volgende formule:

$$n = \frac{\log q_{v;50} - \log q_{v;10}}{\log 50 - \log 10} \quad [\text{Formule 5}]$$

Het ventilatievoud n_{pr} bij een referentiedrukverschil Δp_r wordt berekend door de luchtvolumestroom q_{pr} bij hetzelfde drukverschil te delen door het totale interne volume V . Internationaal wordt een referentiedrukverschil van 50 Pa gehanteerd:

$$n_{50} = \frac{q_{50}}{V} \quad [\text{Formule 6}]$$

Met:

n_{50} = ventilatievoud bij referentiedrukverschil 50 Pa [h^{-1}]

q_{50} = luchtvolumestroom bij referentiedrukverschil 50 Pa [m^3/h]

V = totaal intern volume [m^3]

In Nederland wordt gewoonlijk de karakteristieke luchtvolumestroom bij een referentiedrukverschil van 10 Pa gehanteerd, gedeeld door de gebruiksoppervlakte van de woning. Een drukverschil van 10 Pa is globaal het drukverschil dat, gemiddeld op jaarbasis, over de verschillende openingen aanwezig is [18]:

$$q_{v;10;kar} = \frac{q_{v;10}}{A_g} \quad [\text{Formule 7}]$$

Met:

$q_{v,10;kar}$ = luchtvolumestroom bij referentiedrukverschil 10 Pa per m² vloeroppervlakte, herleid naar een netto-inhoud van 500 m³, indien die inhoud groter is dan 500 m³ [dm³/s·m²]

$q_{v,10}$ = luchtvolumestroom bij referentiedrukverschil 10 Pa [dm³/s]

A_g = gebruiksoppervlakte [m²]

2.3.2 Luchtlekken

Om de invloed van specifieke luchtlekken op het totale infiltratieverlies te bepalen wordt gekeken naar de partiële luchtdoorlatendheidscoëfficiënt (c-waarde). De c-waarde geeft het luchtverlies per meter aansluiting, bijvoorbeeld ter plaatse van een kozijnaansluiting, of per m² opening, bij onder andere schoorsteenkanalen of dakdoorvoeren. Voor nieuwbouw zijn door de SBR-publicatie luchtdicht bouwen drie luchtdichtheidsklassen gedefinieerd [15]. De uitgangspunten per klasse zijn gegeven in Tabel 3. Per luchtdichtheidsklasse worden eisen gehanteerd aan de kwaliteit van de aansluitingen in bouwtechnische details.

Tabel 2: Overzicht luchtdichtheidsklassen en c-waardes voor draaiende delen en openingen in dakconstructies voor nieuwbouw [15].

	Klasse 1: basis	Klasse 2: goed	Klasse 3: Uitstekend
<i>Uitgangspunten</i>	Ondergrens voor eengezinswoningen met kap	Ondergrens voor woongebouwen en woningen met plat dak	Ondergrens Passiefhuisconcept en energieneutraal bouwen
<i>$q_{v,10}$-waarde [dm³/s]</i>	80 – 100	30-60	15
<i>Ventilatiesysteem</i>	A, B, C	D	D
<i>c-waarde draaiende delen in kozijnen (geen kaderdichting, wel tochtprofielen en knevelend hang- en sluitwerk) [dm³/(s·m·Paⁿ)]</i>	0,20	0,15	0,05

In het huidige onderzoek wordt de c-waarde van specifieke luchtlekken bepaald door een meting van de luchtvolumestroom $q_{v,10}$ met het luchtlek in de huidige situatie (nulmeting) en een $q_{v,10}$ -meting waarin het luchtlek is afgedicht. De c-waarde van het luchtlek wordt vervolgens berekend met de volgende formule:

$$c = \frac{q_{v,10} [\text{nulmeting}] - q_{v,10} [\text{luchtlek afgedicht}]}{10^{n_{\text{gemiddeld}}}} \quad [\text{Formule 8}]$$

Voorbeelden van de meetopstelling met de blower door en afgeplakte luchtlekken zijn weergegeven in Figuur 5 - Figuur 8.



Figuur 5: Meetopstelling blower door in deurkozijn.



Figuur 6: Aflezen drukverschil en lucht volumestroom.



Figuur 7: Afplakken luchtlekken rondom gevelrooster.



Figuur 8: Afplakken luchtlekken rondom buitendeur en brievenbus.

2.3.3 Thermografisch onderzoek

Om lucht- en warmtelekken in de casussen te visualiseren zijn gelijktijdig met de blower door tests infraroodopnames gemaakt in de onderdruksituatie. Ter plaatse van lucht- en warmtelekken wijkt de oppervlaktetemperatuur sterk af van de binnenluchttemperatuur. Luchtlekken zijn in de onderdruksituatie zichtbaar doordat buitenlucht via kieren, naden en openingen het gebouw in stroomt. Warmtelekken worden veroorzaakt door verschillen tussen de isolatiewaarde van de bouwdelen, bijvoorbeeld door koudebruggen of slecht isolerende beglazing. Voor een goede beoordeling van warmtelekken worden infraroodopnames gemaakt wanneer een woning wordt verwarmd en de buitentemperatuur laag is. Daarnaast dienen de gevels nog niet te zijn opgewarmd door zonnestraling.

3. Casussen

De praktijkmetingen van de thermische prestatie en/of luchtdichtheid zijn uitgevoerd in 38 woningen in Nederland. In 30 woningen is de warmteweerstand bepaald van één of twee gevels en in 16 woningen is de luchtdichtheid gemeten. De casussen zijn tot stand gekomen

in samenwerking met onder andere de Rijksdienst voor Cultureel Erfgoed, Gemeente Delft en Vereniging Hendrick de Keyser. Belangrijke uitgangspunten voor de selectie van de casussen zijn dat de woningen verspreid liggen over Nederland en representatief zijn voor de monumentale woningvoorraad. De meeste woningen hebben een status als rijksmonument of gemeentelijk monument. Daarnaast bestaan in alle woningen de gevels uit baksteenmetselwerk. Hoewel het onderzoek zich met name richt op massieve baksteengevels, is ook de warmteweerstand van een aantal spouwmuren bepaald. In de woningen zijn zo min mogelijk duurzaamheidsingrepen uitgevoerd, zoals na-isolatie of kierdichting. Enkele casussen hebben momenteel geen woonfunctie, maar hadden oorspronkelijk wel een woonfunctie.

Van niet alle onderzochte woningen is het bouwjaar bekend. Soms is er geen bouwhistorisch onderzoek gedaan, of beschrijft het onderzoek alleen de voorgevel en kunnen de resterende gevels uit een andere tijd dateren. Daarnaast hebben er in veel woningen in de loop van de eeuwen verbouwingen plaatsgevonden. In de analyse van de meetresultaten wordt het bouwjaar daarom niet meegenomen als afhankelijke factor.

Aan de casussen waar de warmteweerstand van de gevel is bepaald zijn de volgende eisen gesteld:

- De gevel bestaat uit ongeïsoleerd massief baksteenmetselwerk en is niet voorzien van een voorzetwand aan de binnenzijde;
- De buitengevel ligt niet aan een zonbelaste zijde;
- Het minimale oppervlakte dichte gevel is 1 x 1 m;
- De gevel grenst aan een verwarmde ruimte;
- Aan de binnenzijde van het meetgebied bevinden zich geen radiatoren of andere warmtebronnen;
- De binnen- en buitenzijde van de gevel zijn toegankelijk voor het bevestigen van sensoren en niet voorzien van een kwetsbare wandafwerking die mogelijk kan beschadigen;
- De woning is beschikbaar voor meetonderzoek in de winterperiode.

Voor het luchtdichtheidsonderzoek zijn meerlaagse woningen in principe niet geschikt omdat de luchtvolumestromen naar de aangrenzende woningen niet in kaart kunnen worden gebracht. In totaal is in 7 woningen een gecombineerd onderzoek van de warmteweerstand- en luchtdichtheid uitgevoerd, in 21 woningen de warmteweerstand van één of meerdere gevels gemeten en is van 8 woningen alleen de luchtdichtheid bepaald. De locaties van de casuswoningen zijn gevisualiseerd in Figuur 9.



Figuur 9: Locaties van de casuswoningen. In de woningen op de groen gekleurde locaties zijn metingen van de warmteweerstand van de gevel uitgevoerd, in de woningen op de rood gekleurde locaties is de luchtdichtheid gemeten en in de woningen op de blauw gekleurde locaties is zowel de warmteweerstand als de luchtdichtheid bepaald. Omdat enkele woningen dicht bij elkaar liggen zijn niet alle 38 locaties zichtbaar in de afbeelding.

4. Resultaten

4.1 Warmteweerstand

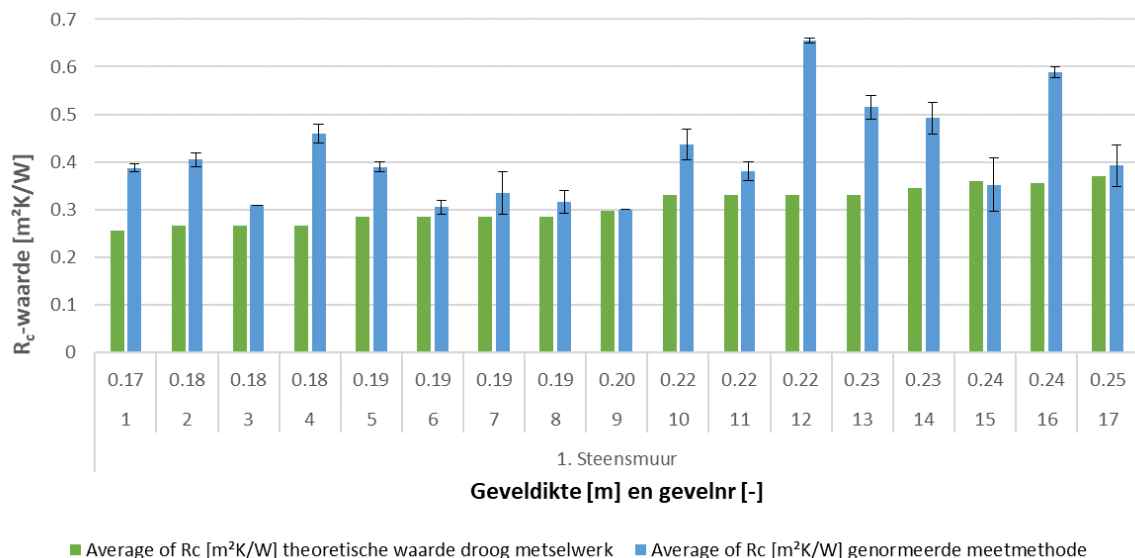
De warmteweerstand is in-situ bepaald voor 34 baksteengevels in monumentale woningen. Het meest voorkomende geveltype in de onderzochte monumentale woningen is de enkelsteens muur. Dikkere muren zijn met name toegepast in vrijstaande woningen, zoals landhuizen, villa's, boerderijen en kasteelachtige gebouwen. Alle metingen zijn uitgevoerd in het najaar en de winter, bij een voldoende lage buitentemperatuur, en in alle woningen is een meetperiode van 2-3 weken gehanteerd. Bij voorkeur zijn de metingen uitgevoerd aan een niet-zonbelaste gevel. Bij enkele gevallen waar alleen een zonbelaste gevel beschikbaar was is de invloed van zonbelasting zo goed mogelijk buiten de analyse van de meetresultaten gehouden, bijvoorbeeld door de sensoren af te schermen.

De theoretische warmteweerstand is berekend aan de hand van de warmtegeleidingscoëfficiënt van droog metselwerk. Een aantal gevels hebben tijdens de metingen te maken gehad met een hoge regenbelasting. Gezien de relatief korte duur van de regenperiodes over de looptijd van de metingen zijn er geen aanwijzingen gevonden dat regen het vochtgehalte van het metselwerk over langere tijd sterk heeft beïnvloed. Indien de dichtheid van de baksteen onbekend is, is gerekend met een dichtheid van 1750 kg/m^3 . Deze gemiddelde dichtheid is afkomstig uit laboratoriumonderzoek naar de karakterisering van historische bakstenen.

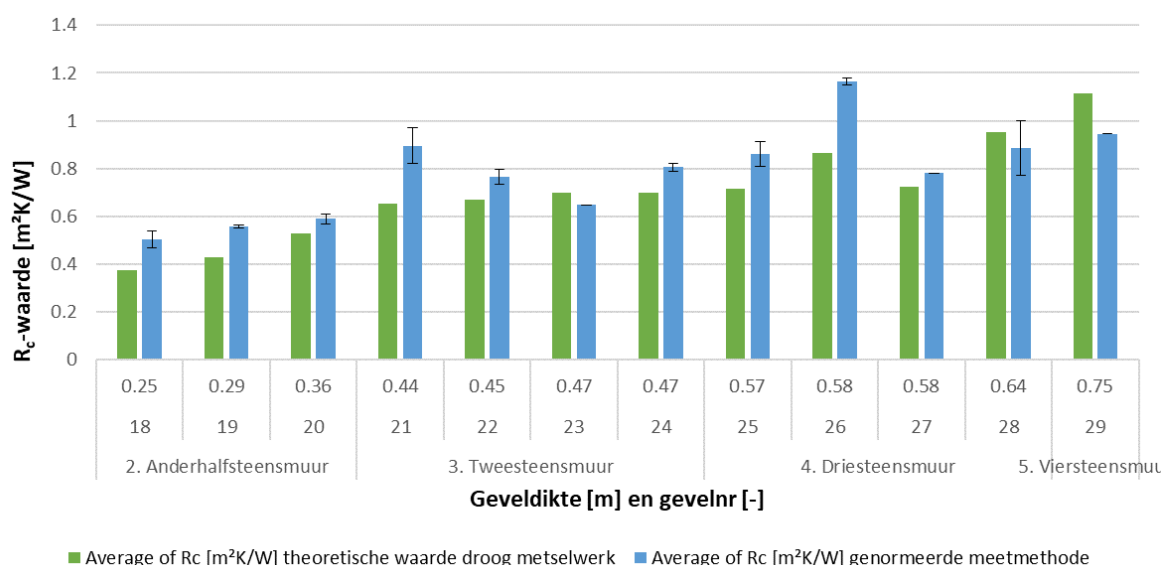
4.1.1 Massieve baksteengevels

Van de 34 casussen bestaan 17 gevels uit enkelsteens metselwerk met een geveldikte variërend tussen 0,17 en 0,25 m en 12 gevels uit anderhalfsteens tot viersteens metselwerk met een geveldikte variërend tussen 0,25 en 0,75 m. De meerderheid van de gevels is aan de binnenzijde voorzien van een pleisterlaag en enkele gevels zijn ook aan de buitenzijde gepleisterd. Een vergelijking tussen de gemeten warmteweerstand en de theoretische

warmteweerstand is gegeven in Figuur 10 voor de enkelsteens muren en Figuur 11 voor de dikkere muren. Bij de meetresultaten geeft de foutenbalk de standaarddeviatie van de middeling tussen de twee meetposities weer. De resultaten laten een grote spreiding zien tussen de gemeten warmteweerstanden, met name bij enkelsteens metselwerkgevels. Bij de meeste casussen ligt de gemeten warmteweerstand boven de theoretische warmteweerstand voor droog metselwerk. De theoretische warmteweerstand van de enkelsteens metselwerkgevels ligt tussen 0,26 en 0,37 m²K/W, terwijl de gemeten warmteweerstand varieert tussen 0,30 en 0,66 m²K/W. Rekening houdend met een onzekerheid van 10% op de praktijkmetingen is de in-situ warmteweerstand ca. 20% hoger dan de theoretische warmteweerstand voor enkelsteens metselwerk.



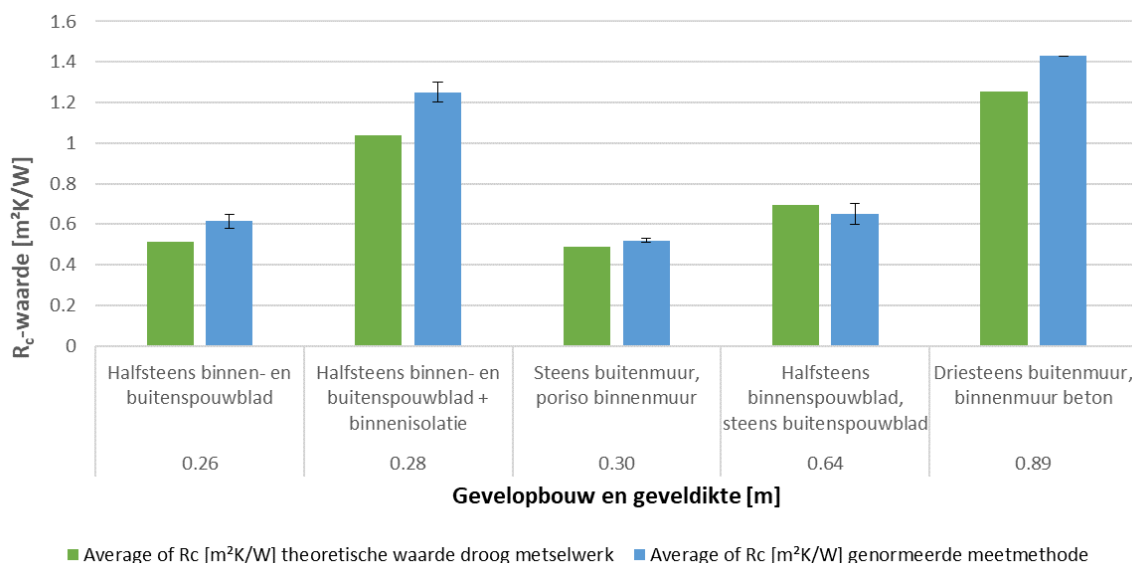
Figuur 10: Vergelijking gemeten en theoretische warmteweerstand voor 17 enkelsteens massieve baksteengevels in monumentale woningen.



Figuur 11: Vergelijking gemeten en theoretische warmteweerstand voor 12 anderhalf- tot viersteens massieve baksteengevels in monumentale woningen.

4.1.2 Spouwmuren

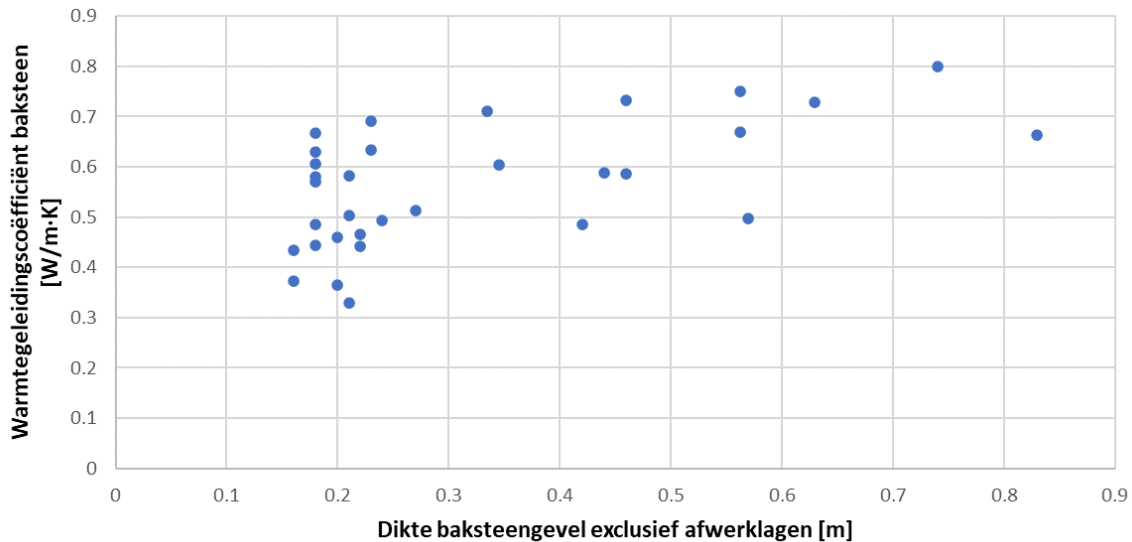
Vijf van de casussen hebben een spouwmuur. Dit zijn woningen gebouwd na 1920, toen spouwmuren gebruikelijk werden, of woningen die tijdens een renovatie zijn voorzien van een binnenmuur met spouw. Bij de spouwmuren zijn de gemeten en theoretische warmteweerstand lastig te vergelijken, omdat deze bepaald worden door zowel de warmteweerstand van de dichte delen als van de luchtspouw. Voor drie gevels ligt de gemeten warmteweerstand enigszins boven de theoretische warmteweerstand, voor twee gevels is het verschil beperkt (Figuur 12).



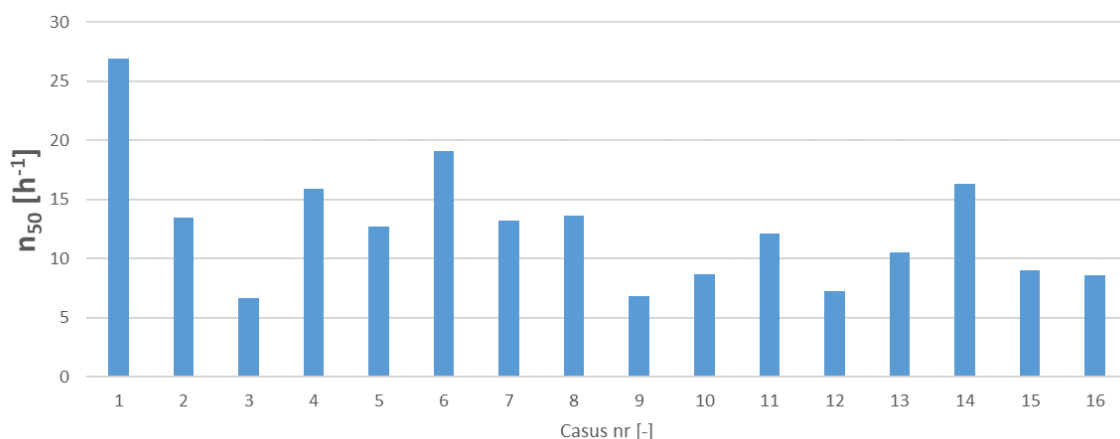
Figuur 12: Vergelijking gemeten en theoretische warmteweerstand voor 5 spouwmuren in monumentale woningen.

4.1.3 Warmtegeleidingscoëfficiënt

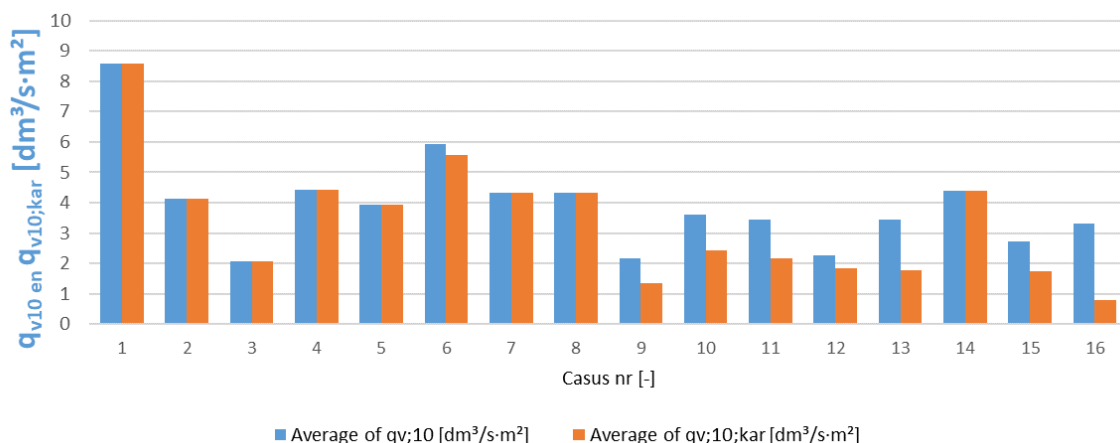
Door de gemeten warmteweerstand van de baksteengevel, exclusief de afwerklagen, te delen door de dikte van het metselwerk kan de warmtegeleidingscoëfficiënt (λ -waarde) van de baksteen worden bepaald. De in-situ gemeten warmtegeleidingscoëfficiënt van de bakstenen, uitgezet tegen de dikte van de gevel, is weergegeven in Figuur 13. De warmtegeleidingscoëfficiënt varieert tussen ca. 0,3 en 0,8 W/m·K. Met name bij de enkelsteensmuren (dikte ca. 0,2 m) varieert de gemeten warmtegeleidingscoëfficiënt sterk.



De resultaten laten zien dat het ventilatievoud bij 50 Pa in de woningen varieert tussen 6 en 26 h⁻¹. Het gemiddelde ventilatievoud is 12.5 h⁻¹ bij 50 Pa. Deze waarde is vergelijkbaar met het gemiddelde ventilatievoud dat werd gemeten in historische woningen in het Verenigd Koninkrijk (Tabel 1). De mate van verduurzamingsmaatregelen is in alle woningen beperkt maar varieert wel: in enkele woningen zijn tochtstrips aanwezig of zijn de gevels en/of het dak voorzien van binnenisolatie. In niet alle gevallen geven deze maatregelen echter een goede verbetering van de luchtdichtheid: na het plaatsen van geïsoleerde voorzetwanden kunnen nog steeds luchtverliezen optreden via valse spouwen. In alle woningen met kap is de gemeten infiltratie door het dak hoog, met name ter plaatse van dakdoorvoeren, de nokaansluiting en de aansluiting van het dak op de gevel.



Figuur 14: Meetresultaten ventilatievoud n_{50} in 16 monumentale woningen.



Figuur 15: Meetresultaten lucht volumestroom q_{v10} en $q_{v10;kar}$ in 16 monumentale woningen.

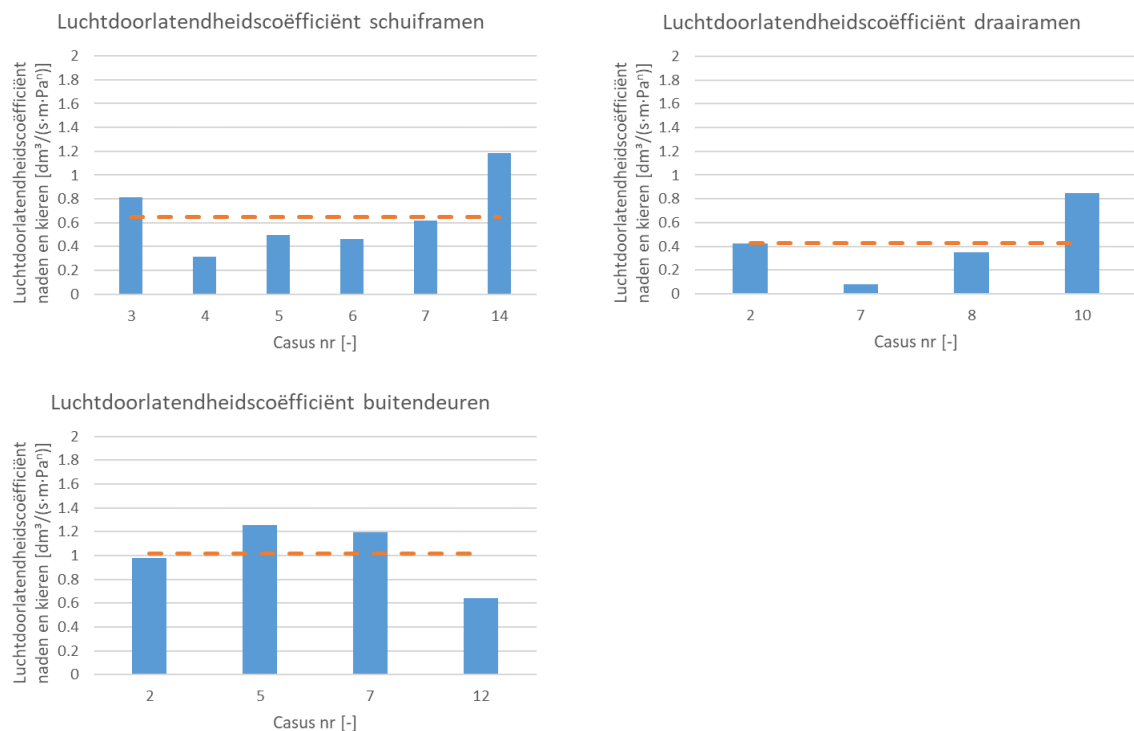
4.3 Luchtlekken

4.3.1 Ramen en deuren

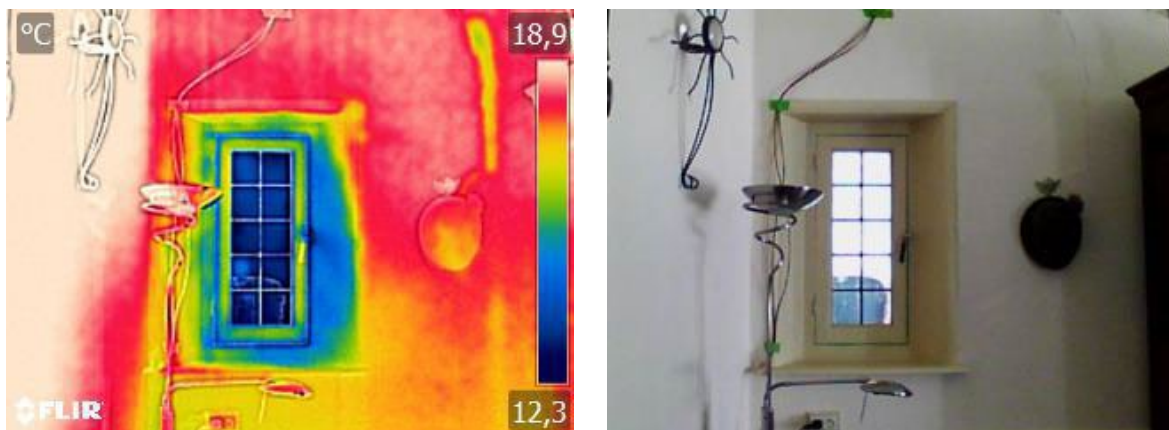
Om de infiltratieverliezen door vensters en buitendeuren te bepalen zijn in een aantal casuswoningen aanvullende blower door tests uitgevoerd waarbij de kieren rondom te openen delen van vensters of deuren zijn afgeplakt. Bij schuiframen zijn alleen de kieren aan de boven- en onderzijde van het te openen deel afgedicht. Figuur 16 geeft de gemeten partiële luchtdoorlatendheidscoëfficiënt voor schuiframen, draairamen en buitendeuren. Te zien valt dat de grootste lekverliezen worden gemeten rondom buitendeuren. In vergelijking

met de richtlijn voor nieuwbouw (Tabel 3) liggen de gemeten c-waardes rondom ramen ca. 2-3 keer hoger dan de ondergrens voor draaiende delen in kozijnen. Het gemiddelde lekverlies rondom schuiframen is ca. 1,5 keer groter dan het gemiddelde lekverlies rondom draairamen. Hierbij moet wel worden vermeld dat de staat van onderhoud van de vensters onderling sterk van elkaar verschilt. In enkele casussen is rondom het venster viltten kierdichting toegepast. Dit wordt echter afgeraden door de RCE, geadviseerd wordt om de opening tussen kozijnen en metselwerk open te laten vanwege droging van het hout.

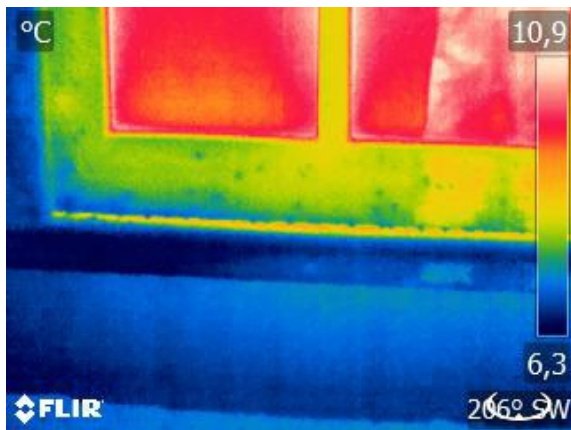
Enkele infraroodopnames van kieren rondom vensters in de onderdruksituatie zijn gegeven in Figuur 17 - Figuur 20. Omdat de metingen zijn verricht bij verschillende buitencondities, verschillen de temperatuurvariaties in de infraroodopnames. De infraroodopnames laten zien dat luchtlekken rondom vensters en onder vensterbanken grote energieverliezen in woningen kunnen veroorzaken.



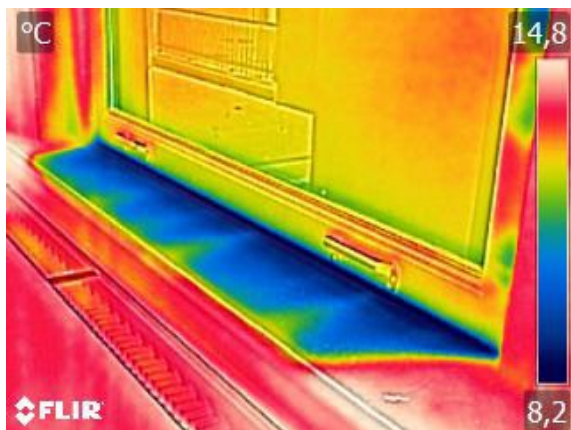
Figuur 16: Gemeten partiële luchtdoorlatendheidscoëfficiënten rondom schuiframen, draairamen en buitendeuren. De gestippelde oranje lijn geeft de gemiddelde waarde aan.



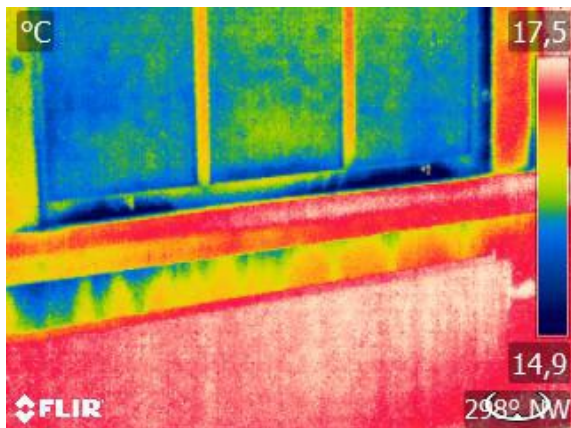
Figuur 17: Infraroodopname lucht- en warmtelekken rondom draairaam.



Figuur 18: Infraroodopname luchttek onder draairaam (gezien vanaf buiten)



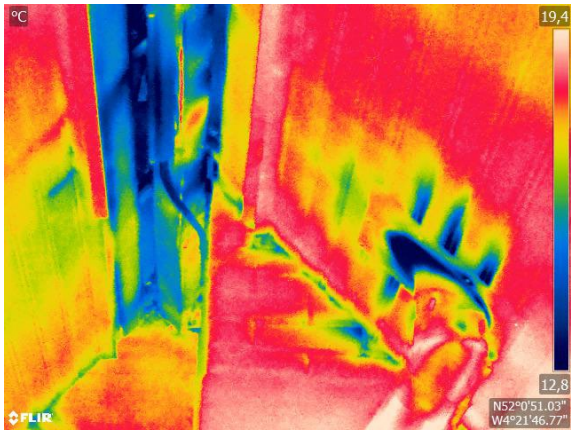
Figuur 19: Infraroodopname luchttek onder schuifraam.



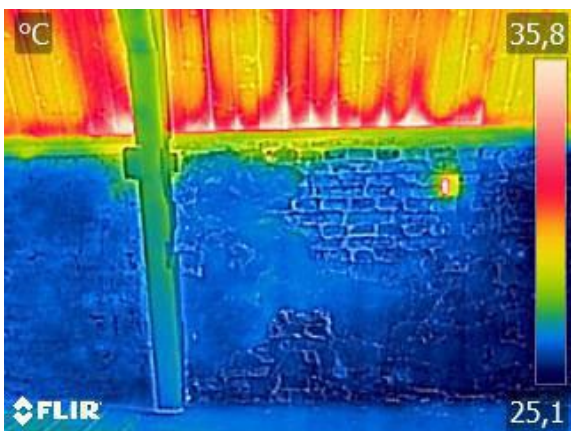
Figuur 20: Infraroodopname luchttek onder vensterbank.

4.3.2 Daken

In alle woningen met kap is de gemeten infiltratie door het dak hoog, met name ter plaatse van dakdoorvoeren, aansluitingen van balkkoppen, de nokaansluiting en de aansluiting van het dak op de gevel. Deze luchtlekken zijn te groot om af te dichten, waardoor het niet mogelijk was om een c-waarde te bepalen. Wel zijn infraroodopnames gemaakt om de lekken te visualiseren. Figuur 21 toont luchtlekken door de nokaansluiting en rondom de dakdoorvoer bij een dak dat aan de binnenzijde is nageïsoleerd en Figuur 22 toont luchtlekken bij de dakvoet.

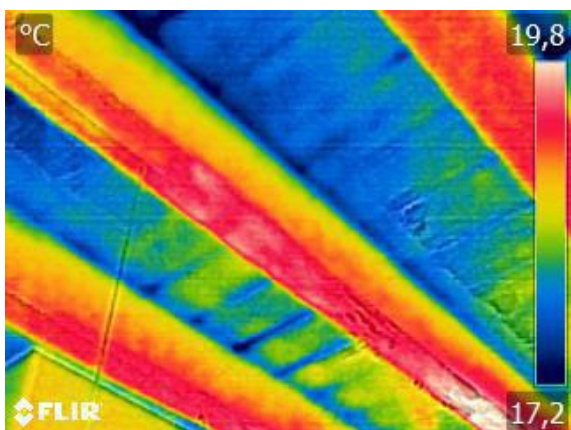


Figuur 21: Luchtlekken bij nokaansluiting en rondom dakdoorvoer van CV-ketel bij een aan de binnenzijde geïsoleerd dak.

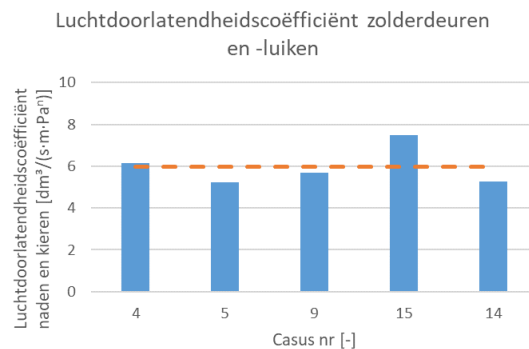


Figuur 22: Luchtlekken bij de aansluiting tussen de gevel en het dak.

Daarnaast is in enkele woningen de afname in luchtvolumestroom gemeten bij het sluiten en afplakken van de zoldervloer of het zolderluik. In dit geval kan er nog wel infiltratie plaatsvinden door de verdiepingsvloer (Figuur 23). De gemiddelde c-waarde van zolderdeuren en -luiken is weergegeven in Figuur 24.



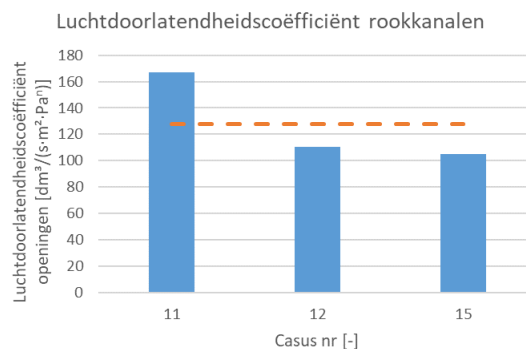
Figuur 23: Luchtlekken door kieren tussen de planken van de verdiepingsvloer.



Figuur 24: Gemeten partiële luchtdoorlatendheidscoëfficiënten rondom zolderdeuren en -luiken. De gestippelde oranje lijn geeft de gemiddelde waarde aan.

4.3.3 Rookkanalen

Via de rookkanalen kan veel warmteverlies optreden in een woning, omdat warme lucht vanwege thermische trek opstijgt. In de meerderheid van de onderzochte casussen is in het rookkanaal een klep aanwezig waarmee het kanaal kan worden afgesloten. Vaak sluiten deze kleppen echter niet volledig af, waardoor warmteverlies blijft optreden. Het uitvoeren van luchtdichtheidsonderzoek met een geopende klep kan zorgen voor veel verspreiding van asdeeltjes in de woning, waardoor dit in het huidige onderzoek geen mogelijkheid was. Daarom zijn in drie casussen de luchtlekkages rondom gesloten kleppen in rookkanalen gemeten door de lucht volumestroom te meten met en zonder extra afdichting van het rookkanaal (Figuur 25).



Figuur 25: Gemeten partiële luchtdoorlatendheidscoëfficiënten rondom rookkanalen met gesloten kleppen. De gestippelde oranje lijn geeft de gemiddelde waarde aan.

5. Conclusies

Voor 34 monumentale baksteengevels is de in-situ warmteweerstand (R_c -waarde) bepaald en vergeleken met theoretische rekenwaarden. De gemeten R_c -waarde van massieve enkelsteens baksteengevels varieert tussen ca. 0,3 en 0,6 m²K/W en is meestal hoger dan de theoretische R_c -waarde. Voor dikkere gevels liggen de gemeten R_c -waarden in de meerderheid van de casussen eveneens boven de theoretische R_c -waarden, maar zijn de conclusies minder eenduidig omdat het aantal onderzochte casussen beperkter is. Het onderzoek laat zien dat op basis van een visuele inspectie de exacte opbouw van een gevel niet altijd goed is in te schatten. In dit geval kan een meting van de warmteweerstand worden uitgevoerd om te kunnen rekenen aan transmissieverliezen en de invloed van na-isolatie.

De luchtdichtheidsmetingen tonen aan dat de luchtdichtheid in monumentale woningen laag is. In de 16 onderzochte woningen is een gemiddeld ventilatievoud (n_{50}) van 12.5 h^{-1} gemeten. Luchtlekken treden voornamelijk op door dakaansluitingen, rondom ramen en deuren en via rookkanalen. Ondanks dat enkele casussen beperkt zijn voorzien van gevel- en/of dakisolatie zijn er geen grote verschillen gemeten in het ventilatievoud tussen woningen met en zonder na-isolatie. De resultaten laten zien dat bij het plaatsen van binnenisolatie een goede afdichting van belang is om luchtlekken via valse spouwen te vermijden. Ook bouwkundige aansluitingen, zoals de dakvoet en de nokaansluiting, en doorvoeren voor leidingen en kanalen dienen zorgvuldig geïsoleerd en afgedicht te worden om luchtlekken te voorkomen.

TAKE-AWAYS

- De gemeten Rc-waarde van massieve steens baksteengevels varieert tussen ca. 0,3 en 0,6 $\text{m}^2\text{K/W}$ en is gemiddeld 20-30% hoger dan de theoretische Rc-waarde.
- Op basis van een visuele inspectie is de exacte opbouw van een gevel niet altijd goed in te schatten. In dit geval kan een meting van de warmteweerstand worden uitgevoerd om preciezer te kunnen rekenen aan transmissieverliezen en de invloed van na-isolatie.
- De luchtdichtheid van monumentale woningen is over het algemeen laag.
- Luchtlekken treden voornamelijk op bij dakaansluitingen, rondom ramen en deuren en via rookkanalen.
- Bij het beperkte aantal onderzochte casussen zijn geen grote verschillen gemeten in het ventilatievoud tussen woningen met en zonder na-isolatie van de gevel of het dak. Een goede afdichting is van belang is om luchtlekken via valse spouwen te vermijden bij binnenisolatie.

6. Referenties

- [1] NTA 8800:2024, Energieprestatie van gebouwen - Bepalingsmethode, 2024.
- [2] Energy saving trust, Energy efficient ventilation in dwellings – a guide for specifiers, London, 2006.
- [3] C. Rye, C. Scott, The SPAB research report 1. U-value report., 2012.
<https://www.spab.org.uk/sites/default/files/documents/MainSociety/Advice/SPABU-valueReport.Nov2012.v2.pdf>.
- [4] E. Lucchi, Thermal transmittance of historical brick masonries: A comparison among standard data, analytical calculation procedures, and in situ heat flow meter

- measurements, *Energy Build.* 134 (2017) 171–184.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.045>.
- [5] E. Lucchi, Thermal transmittance of historical stone masonries: A comparison among standard, calculated and measured data, *Energy Build.* 151 (2017) 393–405.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.002>.
 - [6] NEN-EN 1745, Metselwerk en metselwerkproducten - Methoden voor het bepalen van thermische eigenschappen, 2020.
 - [7] B. Knoll, W.F. De Gids, The air permeability of 21 facades with facade elements in three seasons, IMG-TNO Rep. C 490. (1981) 1–75.
 - [8] R.K. Stephen, Airtightness in UK dwellings: BRE's test results and their significance, Watford, 1998.
 - [9] A. Martín-Garín, J.A. Millán-García, J.M. Hidalgo-Betanzos, R.J. Hernández-Minguillón, A. Bañi, Airtightness analysis of the built heritage – Field measurements of nineteenth century buildings through blower door tests, *Energies.* 13 (2020) 1–28.
<https://doi.org/10.3390/en13246727>.
 - [10] L. Eskola, Ü. Alev, E. Arumägi, J. Jokisalo, A. Donarelli, K. Sirén, T. Kalamees, Airtightness, air exchange and energy performance in historic residential buildings with different structures, *Int. J. Vent.* 14 (2015) 11–26.
<https://doi.org/10.1080/14733315.2015.11684066>.
 - [11] NEN-ISO 9869-1, Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method (ISO 9869-1:2014,IDT), 2014.
 - [12] S. Flores Larsen, M. Hongn, N. Castro, S. González, Comparison of four in-situ methods for the determination of walls thermal resistance in free-running buildings with alternating heat flux in different seasons, *Constr. Build. Mater.* 224 (2019) 455–473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.033>.
 - [13] D. Bienvenido-Huertas, J. Moyano, D. Marín, R. Fresco-Contreras, Review of in situ methods for assessing the thermal transmittance of walls, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 102 (2019) 356–371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.016>.
 - [14] I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, D.A. Kontogeorgos, M.A. Founti, A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls, *Energy Build.* 154 (2017) 198–206.
 - [15] SBR, Luchtdicht bouwen theorie - ontwerp - praktijk, 2013.
 - [16] NEN-EN-ISO 9972, Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method (ISO 9972:2015,IDT), 2015.
 - [17] SKH, SKH-Beoordelingsgrondslag 13-01 Luchtdichtheidsmetingen, Wageningen, 2016.
 - [18] P. Erdtsieck, Meten en berekenen luchtdoorlatendheid, 2005.

NA-ISOLATIE VAN HISTORISCH BAKSTEENMETSELWERK: IN-SITU MONITORING EN SIMULATIE VAN TWEE CASUSSEN

Staf Roels, KU Leuven; Evy Vereecken, KU Leuven; Martin Tenpierik, TU Delft en Marc Stappers, RCE

Samenvatting

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 schadenfenomenen correcter in te schatten. In dit artikel beschrijven we eerst twee concrete casussen waarbij via een intensieve meetcampagne de hygrothermische prestaties van het na-isolatiesysteem opgevolgd werden. Daarna vergelijken we voor een van de casussen de resultaten van numerieke voorspellingen met de opgemeten prestaties.

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 schadenfenomenen 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 klimaatverandering, 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 de energetische verbetering afweegt ten opzichte van mogelijke risico's op schade. Hygrothermische simulaties kunnen daarbij een belangrijke rol spelen. In het kader van het onderzoeksproject werden twee case studies van renovatieprojecten nauwgezet opgevolgd. Zowel voor de verbouwing van het landgoed de Grote Noordijk in Wilp als voor de renovatiecampagne van het Rosenstock-huussy complex in Haarlem is 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 van beide renovatieprojecten. In het tweede deel komen de overeenkomstige numerieke simulaties aan bod.

2. Meetcampagne van het hygrothermisch gedrag van twee binnenisolatiesystemen in concrete renovatieprojecten.

In het kader van het onderzoeksproject 'Energetische prestaties van massieve bakstenen gevels in woonhuismonumenten' werd het hygrothermisch gedrag van twee concrete renovatieprojecten in detail opgemeten. Via een meetcampagne werden temperaturen en relatieve vochtigheid continu opgevolgd op verschillende posities in de nageïsoleerde wand.

Een van de cases in het project is het landgoed de Grote Noordijk in Wilp, het andere project betreft de renovatie van het Rosenstock-huussy complex in Haarlem.

2.1 Binnenisolatie voor het landgoed de 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 landgoed 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 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 (Figuur 1). 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.



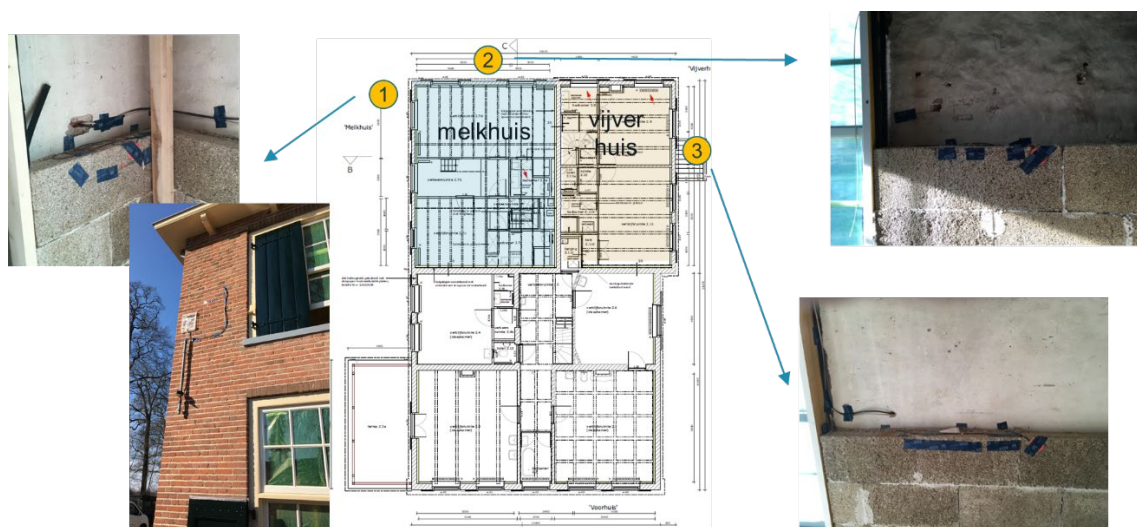
Figuur 1: Links: buitengevels na renovatie van Melkhuis en Vijverhuis van landgoed de Grote Noordijk in Wilp, rechts: binnenzicht na renovatie (met op de kleine foto de toestand tijdens het plaatsen van de binnenisolatie)

De oorspronkelijk gevels van het Melk- en Vijverhuis bestaan uit massief steens metselwerk met een dikte van ongeveer 21 cm. Deze was op verschillende plekken voorzien van een stuc laag 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 stuc laag 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 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 kalkhennepvezels. 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.

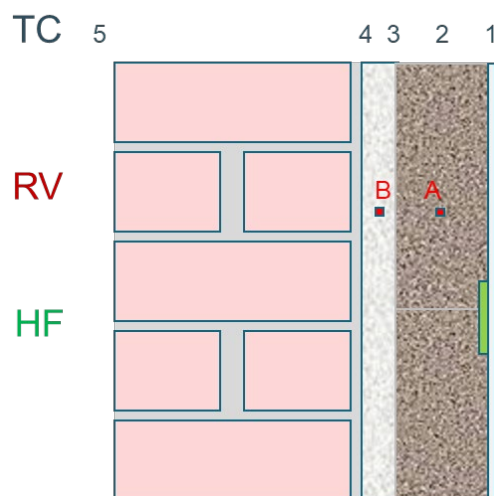
Monitoring van de prestaties

Figuur 2 toont de beide achtergebouwen tijdens de renovatiefase. 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 vochtigheid 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.



Figuur 2: 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.

Ingebouwde sensoren:



Thermokoppels (TC) van binnen naar buiten

- op het buitenoppervlak
- op het scheidingsvlak tussen metselwerkwand en isolatie
- op het scheidingsvlak tussen kalkhennepvulsel en kalkhennepblokken
- in het midden van het kalkhennepblok
- op het scheidingsvlak tussen kalkhennepblok en binnenpleister

Relatieve vochtigheidssensoren (RV)

- in het midden van het kalkhennepvulsel
- in het midden van het kalkhennepblok

Warmtestroommeter (HF)

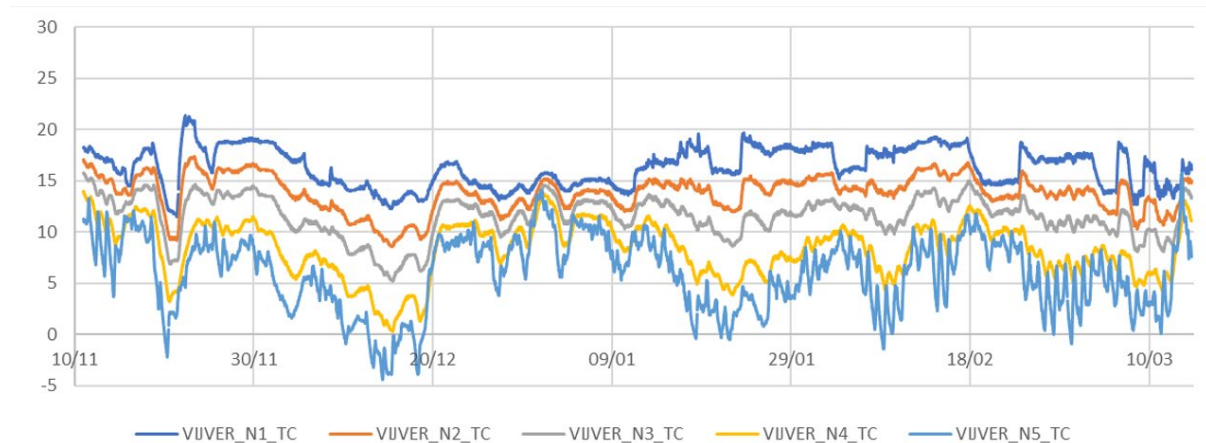
- op het scheidingsvlak tussen kalkhennepblok en binnenpleister

Figuur 3: Schematische voorstelling van de wand met de ingebouwde meetsensoren.

Resultaten van de meetcampagne

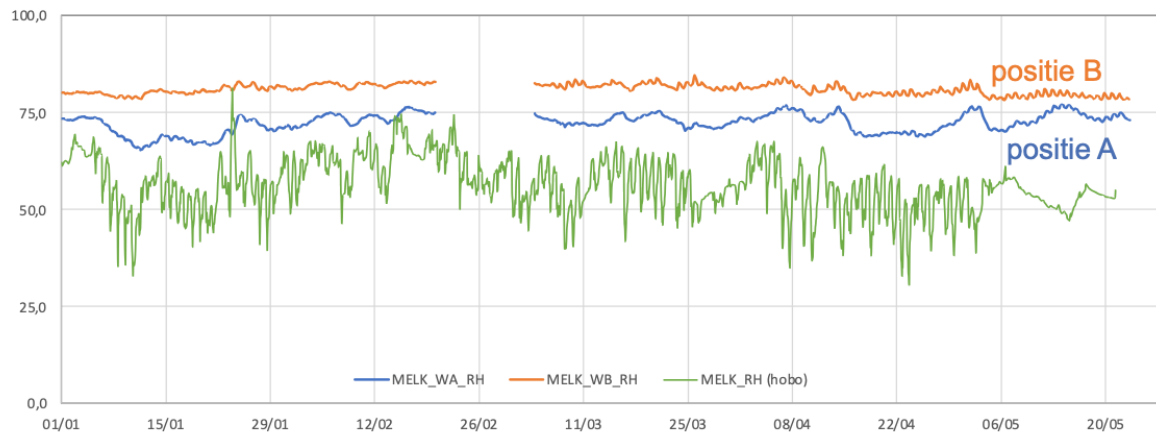
In een korte meetcampagne voor renovatie werd de Rc-waarde van de ongeïsoleerde wand bepaald. Voor de noordzijde leverde dit een Rc-waarde van $0,38 \text{ m}^2\text{K/W}$ op, wat goed overeenkomt met de theoretische waarde op basis van de warmtegeleidingscoëfficiënt van de bakstenen. Aan de westzijde 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 gelijkaardige analyse is uitgevoerd na het isoleren van de wanden aan de hand van de opgemeten temperatuurprofielen. Figuur 4 toont bij wijze van voorbeeld de opgemeten temperaturen voor meetpositie 3 (zie 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.



Figuur 4: Opgemeten temperaturen in de noordwand (vijverhuis) voor de winter van 2022-2023.

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 bekomen Rc-waarden voor de verschillende posities bedragen ongeveer $1,1$ à $1,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ terwijl het aangebrachte isolatiepakket alleen een theoretische weerstand zou moeten hebben van ongeveer $1,5 \text{ m}^2\text{K/W}$. Het feit dat deze waarde niet gehaald worden, kan toegeschreven worden aan een combinatie van factoren: 1) de dikte van de blokken en de warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal blijken iets minder 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 relatieve vochtigheid. Figuur 5 toont de opgemeten relatieve vochtigheid in het midden over de dikte van de blokken en in het midden van het vulsel (respectievelijk A en B in Figuur 3) voor meetpositie 2 en dit sinds januari 2024. Voor de volledigheid is ook de relatieve vochtigheid in de binnenomgeving (groene lijn) meegegeven. Het is duidelijk dat de relatieve vochtigheid van de kalkhennep nagenoeg continu meer dan 70% bedraagt en dicht bij de oude metselwerk wand meer dan 80%.



Figuur 5: Opgemeten relatieve vochtigheid in de kalkhennepisolatie in de westgevel (melkhuys) van januari tot tot eind mei 2024.

Besluit meetcampagne Grote Noordijk

Bij de renovatie van het Melkhuys en Vijverhuys op het landgoed Grote Noordijk is kalkhennep toegepast als binnenisolatie. Uit de meetcampagne blijkt dat in de winterperiodes de relatieve vochtigheid in de binnenisolatie nagenoeg continu rond de 70 à 80% schommelt. Dit is ondermeer te wijten aan het feit dat de kamers maar beperkt verwarmd zijn en de relatieve vochtigheid van de binnenomgeving ook aan de hoge kant is. Bovendien is de oorspronkelijke wand aan de binnenzijde voorzien van een cementbepleistering die uitdroging naar de buitenomgeving bemoeilijkt. De hoge relatieve vochtigheid 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.

2.2 Binnenisolatie voor het Rosenstock-huessy complex in Haarlem

Het Rosenstock-huessy complex in Haarlem behelst een veelheid aan gebouwen. Voor de meetcampagne zijn we op zoek gegaan naar het meest kwetsbare geveldeel om binnenisolatie op toe te passen. Daarbij is de keuze gevallen op een tipgevel uit massief steens metselwerk met een dikte van ongeveer 21 cm die zuid-zuidwest geïoriënteerd is (zie Figuur 6). De wand is aan de buitenzijde voorzien van een waterkerende bepleistering die niet meer in optimale staat is. Aan de binnenzijde is wand afgewerkt met een klassieke binnenpleister. Bij renovatie is de wand aan de binnenzijde nageïsoleerd met twee lagen minerale wolplaten. Een eerste laag bevindt zich tussen de bestaande wand en een nieuwe voorzetconstructie in aluminium stijl- en regelwerk. Dit stijl- en regelwerk is op zijn beurt gevuld met een tweede laag minerale wol en afgewerkt met een damp scherm en gipskartonplaat.



zuid-zuidwest geöriënteerd

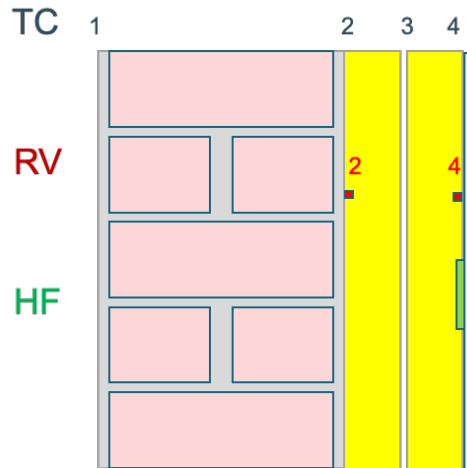
Figuur 6: Links: google maps view van het Rosenstock-huetsy complex in Haarlem en rechts: buitenzicht van de gevel uitgekozen voor de meetcampagne.

Monitoring van de prestaties

Net als bij het renovatieproject van Grote Noordijk, zijn ook in dit project meetsensoren ingebouwd tijdens de renovatie om achteraf het hygrothermisch gedrag te evalueren. Figuur 7 toont de inbouw van de sensoren tijdens de constructiefase. De temperatuur is opnieuw opgemeten op alle scheidingsvlakken, de relatieve vochtigheid aan de binnen- en buitenzijde van de isolatie en de warmtestroom tussen isolatie en gipskartonplaat. Figuur 8 toont de posities van de meetsensoren.



Figuur 7: Tijdens de renovatiefase werden temperatuur- en RV-sensoren ingebouwd op verschillende posities in de wand om het hygrothermisch gedrag van de nageïsoleerde wanden op te volgen.



Ingebouwde sensoren:

Thermokoppels (TC) van binnen naar buiten

- op het buitenoppervlak
- op het scheidingsvlak tussen metselwerkwand en isolatie
- tussen de twee lagen minerale wol
- aan de achterzijde van het dampscherm

Relatieve vochtigheidssensoren (RV)

- tussen metselwerk en isolatie
- tussen isolatie en dampscherm

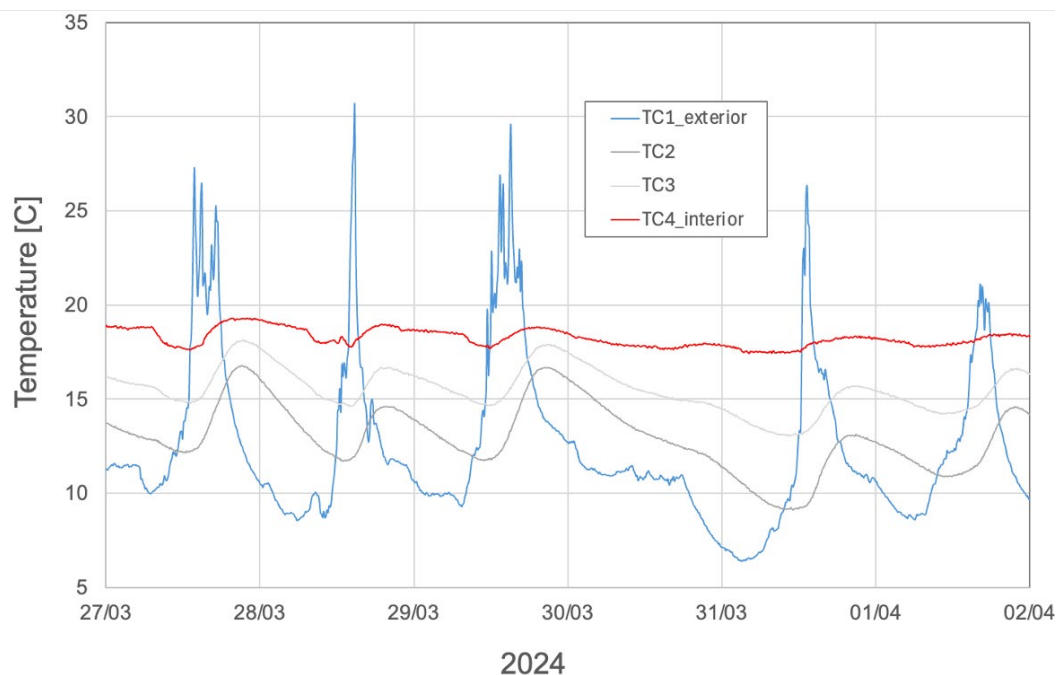
Warmtestroommeter (HF)

- aan de achterzijde van het dampscherm

Figuur 8: Schematische voorstelling van de wand met de ingebouwde meetsensoren.

Resultaten van de meetcampagne

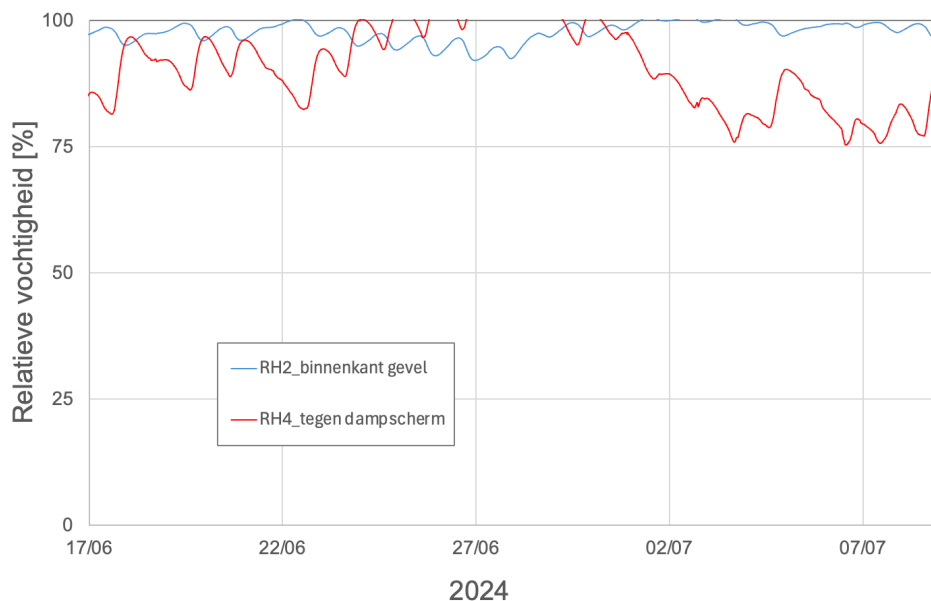
De meetcampagne is pas gestart eind maart 2024 waardoor niet voldoende wintergegevens beschikbaar zijn om een betrouwbare Rc-waarde van de wand te berekenen. Zoals te zien op Figuur 9 waarop het verloop van de opgemeten temperaturen voor enkele dagen eind maart tot begin april weergegeven is, is het gedrag in de lente al erg niet stationair, waarbij vooral de buitentemperatuur grote schommeling ondergaat tussen afkoeling 's nachts en temperatuurstijging overdag door zoninstraling. Een benaderende analyse voor een koude nacht leert dat de gerealiseerde warmteweerstand van de isolatie nauw lijkt aan te sluiten bij de theoretische waarde.



Figuur 9: Temperatuurverloop op de verschillende posities (zie Figuur 8) voor de week van eind maart 2024.

De sterk wisselende temperatuur van het buitenmetselwerk zorgt ervoor dat de warmtestroom in het tussenseizoen ook geregeld van richting wisselt. Zo zal in de zomer het (oude) metselwerk ook aan de binnenkant vaak warmer staan dan de binnenafwerking in gipskarton. Op dat moment draait niet enkel de warmtestroom om (warmtetransport van buiten naar binnen i.p.v. van binnen naar buiten), maar zal ook vocht aanwezig in de

constructie naar de koude binnenkant verplaatsen. Dit is in voorliggend project duidelijk het geval, zoals ook te zien op Figuur 10 dat de relatieve vochtigheid opgemeten aan beide zijden van de isolatie toont voor een zomerweek eind juni. Wat opvalt zijn de hoge waarden die gemeten worden. Die kunnen vermoedelijk toegeschreven worden aan het feit dat de wand sterk is blootgesteld aan slagregen en de buitenpleister niet langer een voldoende regenwering vormt. Daardoor zal aflopend regenwater via scheuren in het oude metselwerk kunnen lopen en op die manier de constructie bevochtigen. Anderzijds zorgt de buitenbepreistering ervoor dat uitdroging wordt bemoeilijkt. Ook aan de binnenzijde is uitdroging nagenoeg onmogelijk omdat het dampscherm een erg hoge dampweerstand heeft (de technische fiche vermeldt een sd-waarde groter dan 1500 meter). Daardoor blijft insijpelend vocht opgesloten in de constructie en het zal daarbij continu verhuizen naar de koudste zijde. In de zomer (bv. op 27/06 in Figuur 10) zal dit geregeld de binnenzijde zijn, waarbij er condensatie optreedt tegen het dampscherm.



Figuur 10: Opgemeten relatieve vochtigheid aan beide zijden van de isolatie eind juni, begin juli 2024.

Besluit meetcampagne Haarlem

Bij de renovatie van het Rosenstock-huessy complex in Haarlem is gebruikt gemaakt van minerale wol achter en tussen een metalen stijl- en regelwerk. Aan de binnenzijde is het geheel afgewerkt met een erg dampdichte folie (sd > 1500 meter) en gipskartonplaten. De meetcampagne nam een van de meest delicate geveldelen onder de loep: een zuid-zuidwestgeëoriënteerde puntgevel voorzien van een oude buitenbepreistering. De behaalde Rc-waarde lijkt op het eerste zicht prima te zijn, maar de slagregenbelaste gevel met buitenbepreistering in combinatie met het dampdichte dampscherm resulteert in hoge relatieve vochtigheden in de constructie die aanleiding geven tot zomercondensatie (condensatie aan de binnenzijde) tijdens zomerperiodes.

2.3 Besluit en aanbevelingen op basis van beide meetcampagnes

De analyse van beide projecten toont dat zelfs in goed voorbereide renovatieprojecten de behaalde prestaties niet altijd overeenkomen met de verwachtingen. Daarom stellen we op basis van de resultaten bekomen in de hierboven besproken praktijkstudies twee belangrijke aanbevelingen voor:

1. Na-isolatie vraagt om een multidisciplinaire aanpak: Bij de keuze van een isolatiesysteem en -materiaal zou bij voorkeur kennis moeten worden betrokken van een architect, een bouwhistoricus, een bouwfysicus en een aannemer. De (restauratie)architect coördineert daarbij (onder andere) het bouwfysische ontwerpproces inclusief de bouwtechnische detaillering en neemt daarin de wensen van de gebruiker en/of beheerder mee. De bouwhistoricus heeft als taak de monumentale waarden van een historisch gebouw te duiden. Bijzondere constructies en afwerklagen moet gekend zijn. De bouwfysicus geeft de verschillende mogelijkheden om na te isoleren aan. Daarbij betreft hij:
 - a. de omgeving van het gebouw
 - b. het gebouw zelf (met aandacht voor de al aanwezige gebreken);
 - c. het (toekomstige) gebruik.

Op basis van zijn analyse doet hij een voorstel voor een isolatiesysteem en -materiaal waarbij de kans op schade nihil is. De aannemer bekijkt in overleg met de architect de maakbaarheid/uitvoerbaarheid van de bouwkundige detaillering. De bouwfysicus zal tegelijkertijd toetsen op de bouwfysische aspecten zoals warmteweerstand, inwendige condensatie en luchtdichtheid. Door het isolatievraagstuk multidisciplinair op te pakken, kan bouwfysische schade maximaal worden vermeden.

2. Na-isolatie vraagt om systeemdenken: Het hygrothermisch gedrag van een metselwerkwand nageïsoleerd met binnenisolatie is een samengestelde wand die in alle seizoenen correct moet presteren. De keuze van het binnenisolatiesysteem dient daarbij afgestemd op de bestaande wand. Zo dient bv. de minimale en maximale Sd-waarde van een dampremmende folie nauwkeurig te worden voorgeschreven in functie van de samenstelling en uitvoeringskwaliteit van de bestaande wand. Het is namelijk niet alleen belangrijk om inwendige condensatie in de winter te voorkomen. Bij binnenisolatie kan ook in de zomer condensatie ontstaan aan de koude zijde, dus precies andersom dan in de winter: aan de dampremmende laag, zogenaamde zomercondensatie. Door een zeer hoge Sd-waarde te kiezen kan in de warme maanden slagregen dat door het metselwerk wordt opgenomen, en naar binnen toe wordt getransporteerd, onvoldoende naar binnen toe verdampen. En dat probleem neemt alleen maar toe door kortere, meer intense regenbuien en de wens om hogere binnentemperaturen, als gevolg van hoger buitentemperaturen, te compenseren met een airco.

3. Numerieke simulaties

Voor de praktijkstudie van Grote Noordijk in Wilp, zijn de metingen ter plaatse aangevuld met een uitgebreide numerieke simulatie. Daartoe zijn de hygrothermische eigenschappen van de toegepaste baksteen en kalkhennepisolatie zo goed als mogelijk opgemeten in het laboratorium van de KU Leuven. Hiertoe zijn kwikintrusie porosimetrie, hygroscoopische sorptie, vacuümsaturatie, en warmtegeleidingsmetingen verricht. Om een goed beeld te krijgen van de mogelijkheden en beperkingen van hygrothermische simulaties is gebruik gemaakt van zowel de software Delphin als WUFI 2D en zijn de resultaten van deze numerieke simulaties 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 in verband met slagregenbelasting de meest kritische is.

3.1 Materialen en methode

Materiaaleigenschappen

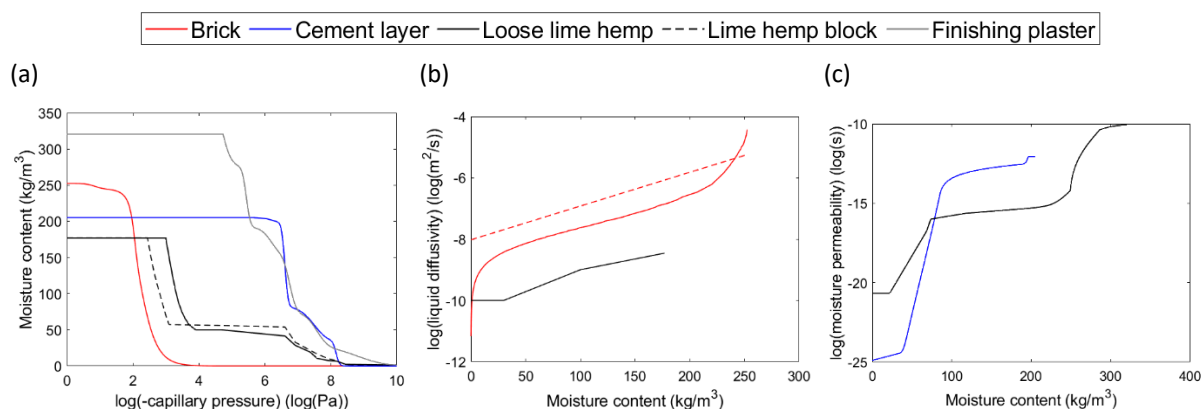
Tabellen 1 en 2 en Figuur 11 geven een overzicht van de materiaaleigenschappen. De belangrijkste eigenschappen van de baksteen en de kalkhennep zijn gebaseerd op laboratoriummetingen. Voor de baksteen is de vochtdiffusiviteit bepaald op twee manieren: 1.) gebaseerd op de vereenvoudigde Kieël-Künzel methode [3] waarbij gebruik wordt gemaakt van de capillaire waterabsorptiecoëfficiënt en de wateropnamecoëfficiënt en 2.) via de liniaal methode welke ook informatie bevat over de hoogte van het vochtfront [4]. Voor de losse kalkhennep en kalkhennepblokken zijn de vochttransporteigenschappen overgenomen uit de WUFI 2D-database.

Tabel 1: Eigenschappen van de gevelmaterialen van het Melkhuis (zwart is gemeten in het laboratorium; grijs is bepaald op basis van de Delphin/WUFI database of van technische productfiches).

eigenschap	Baksteen Melkhuis	Cemente- ringslaag	Kalkhennep blokken	Kalkhennep vulsel	Pleister- laag
Massadichtheid (kg/m^3)	1629,9	1876,1	345	285	1200
Open porositeit (%)	38,7		41	50	
A_{cap} ($\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$)	0,355	0,04	0,0736	0,0736	0,05
w_{cap} (kg/m^3)	252,5	205,1	177	177	320,7
c_p (J/kgK)	850	758	1560	1560	840
μ (-) (droog tenzij vermeld)	5	41,28	30% RV: 3,7 90% RV: 3,3	30% RV: 3,7 90% RV: 3,3	12

Tabel 2: Warmtegeleidingscoëfficiënt ($\text{W/(m}\cdot\text{K)}$) van de gevelmaterialen van het Melkhuis.

T ($^{\circ}\text{C}$)	Baksteen Melkhuis	Cemente- ringslaag	Kalkhennep blokken	Kalkhennep vulsel	Pleister- laag
-0,1 (droog)	0,564				
9,9 (droog)	0,578		0,0782	0,0663	
19,9 (droog)	0,592	0,803	0,0812	0,0695	0,73
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 11: vochtretentiecurves (a) en vochttransporteigenschappen (b,c) zoals gebruikt in de numerieke simulaties. Opgemerkt zij dat de grafieken zijn getoond (en zijn gebruikt) tot capillair vochtgehalte. De rode gestippelde lijn in (b) geeft de diffusiecoëfficiënt op basis van de vereenvoudigde Kieël-Künzel vergelijking.

Voor de cementeringslaag op het binnenoppervlak van de originele metselwerkmuur en voor de binnenpleister op de isolatie zijn respectievelijk materiaal ID842 en ID124 uit de Delphin-database gebruikt. Aangezien in de praktijk onder normale omstandigheden niet wordt verwacht dat een vochtgehalte boven het capillaire vochtgehalte wordt bereikt, is in de huidige studie dit capillaire vochtgehalte als bovengrens gehanteerd. Voorts is voor de bakstenen aangehouden dat de warmtegeleidingscoëfficiënt als functie van de hoeveelheid vocht toeneemt met 5% per massa% water.

Randvoorwaarden en begincondities

De begincondities in de gevel zijn zoals aangegeven in Tabel 3. De numerieke simulaties zijn uitgevoerd van 1 augustus 2022 tot eind maart / begin april 2024. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de starttijd van de simulaties ongeveer 3 maanden ligt voor de start van de meetcampagne. Op deze manier is het mogelijk om de invloed van de begincondities op de resultaten te beperken.

Tabel 3: Begincondities voor de temperatuur en relatieve vochtigheid in de numerieke simulaties.

Materiaal	Starttemperatuur (°C)	Start RV (%)
Baksteen	20	90
Cementeringslaag oorspronkelijke gevel	20	90
Kalkhennepvulling	20	90
Kalkhennepblokken	20	95
Binnenpleister	20	95

Voor de randvoorwaarden aan de buitenzijde zijn de klimaatgegevens van een nabijgelegen KNMI weerstation (Deelen) gebruikt. Dit weerstation bevindt zich op een afstand van 23 km hemelsbreed van Grote Noordijk. Slagregen op de gevel is in Delphin geïmplementeerd via de horizontale neerslag uit de weergegevens en het regenmodel uit DIN EN ISO 15927-3 [5] en in WUFI via het regenmodel uit ASHRAE 160 [6]. De invoer in beide simulaties is zodanig ingesteld dat de slagregenbelasting gelijk is. De regenblootstellingscoëfficiënt is ingesteld op 0,7, wat de voorgestelde waarde is voor beschutte gebouwen met een hoogte lager dan 10 meter [5][7]. 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 ($1,22 \times 10^{-7}$ s/m).

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 geval van een buitentemperatuur tussen 10°C en 20°C is lineaire interpolatie tussen 18°C en 23°C toegepast. Deze aanname is gedaan omdat de woningen niet of nauwelijks bewoond waren waardoor de binnentemperatuur lager zal zijn dan volgens EN-ISO 13788 [8]. 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 $7,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ gezet. De overdrachtscoëfficiënt voor vochttransport aan het binnenoppervlak is bepaald met de Lewis correlatie ($1 \times 10^{-8} \text{ s/m}$).

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 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 elkaar vergeleken. Daarnaast is de impact van de regenblootstellingsfactor bestudeerd.
- III. Delphin: de potentiële invloed van de langgolvlige straling: vanwege een gebrek aan informatie over de langgolvlige straling voor het bestudeerde gebouw, is in het referentiegeval alleen via de warmteoverdrachtscoëfficiënt rekening gehouden met deze stralingsuitwisseling. Om de potentiële invloed van deze aanname te analyseren, is een aanvullende simulatie uitgevoerd met langgolvlige straling uit het testreferentiejaar 2010 voor Essen. In de laatste simulatie is de warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de buitenkant verlaagd tot $19 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- IV. Delphin + WUFI: de potentiële invloed van vereenvoudigde of veronderstelde materiaaleigenschappen: de invloed van een vereenvoudigde benadering voor de diffusiviteit van de baksteen (Kießl-Künzel-methode versus Liniaal-methode) is geanalyseerd. Daarnaast zijn ter vergelijking drie bakstenen uit Delphin en twee bakstenen uit WUFI met een capillaire absorptiecoëfficiënt en capillair vochtgehalte vergelijkbaar aan de echte baksteen geselecteerd uit de database (zie Tabel 4) en gebruikt voor het modelleren van de testcase.
- V. WUFI: de potentiële impact van de binnencondities: vanwege gebrek aan informatie omtrent de relatieve luchtvochtigheid binnen zijn drie binnencondities in WUFI onderzocht: 1.) De basisconditie waarbij de waterdampspanning binnen continue 300 Pa hoger is dan de waterdampspanning buiten. 2.) Klasse 1 uit EN-ISO 13788 [8] waarbij de waterdampspanning binnen in de winter (buitentemperatuur $< 0^\circ\text{C}$) 270 Pa boven de waterdampspanning buiten ligt en in de zomer (buitentemperatuur $> 20^\circ\text{C}$) gelijk is aan 100 Pa boven de waterdampspanning buiten, met in de tussenliggende periode lineaire interpolatie. 3.) Klasse 2 uit EN-ISO 13788 [8] waarbij de waterdampspanning binnen in de winter (buitentemperatuur $< 0^\circ\text{C}$) 640 Pa boven de waterdampspanning buiten ligt en in de zomer (buitentemperatuur $> 20^\circ\text{C}$) gelijk is aan 100 Pa boven de waterdampspanning buiten, met in de tussenliggende periode lineaire interpolatie. In alle gevallen is de RV binnen gemaximeerd op 100%.

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

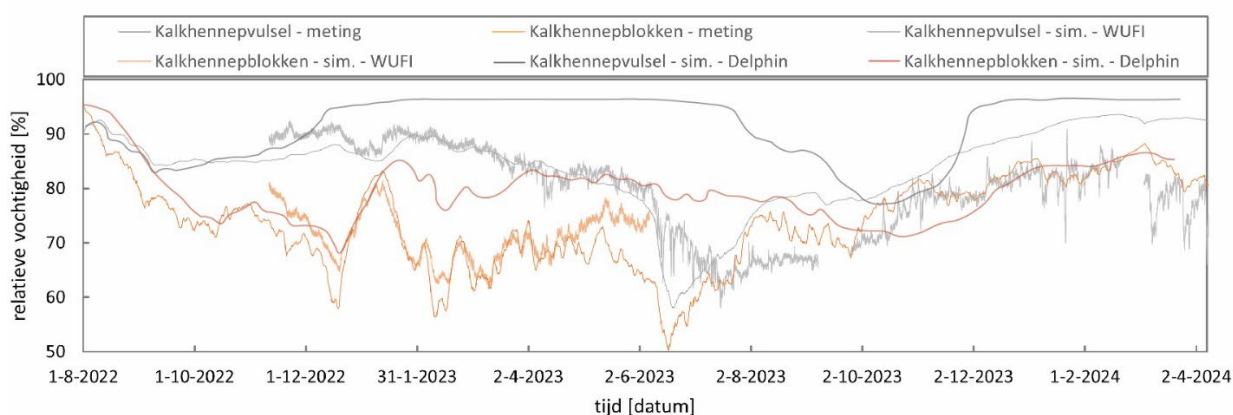
Tabel 4: Eigenschappen van de bakstenen uit de Delphin en WUFI database.

Materiaal	ID	A_{cap} ($\text{kg/m}^2\text{s}^{0,5}$)	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)		0,39	230	310
Solid Brick Hand-formed (Fraunhofer IBP)		0,35	200	380

3.2 Simulatieresultaten

Vergelijking tussen Delphin en WUFI en resultaten meetcampagne

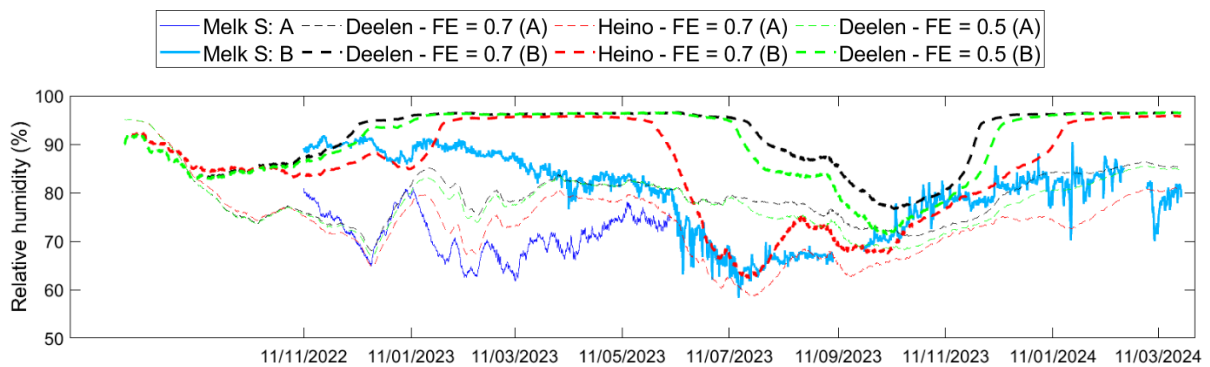
Figuur 12 toont de resultaten van de simulaties in Delphin en WUFI op basis van de basisinput in vergelijking tot de gemeten hygrothermische respons. Voor beide modellen is dezelfde input en de meteodata van KNMI weerstation Deelen gebruikt. Zoals te zien aan de figuur valt de voorspelling van de RV in het kalkhennepvulsel en in de kalkhennepblokken 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 geven maar lijkt te maken te hebben met hoe de slagregenbelasting meegenomen wordt in beide simulatiemodellen.



Figuur 12: Vergelijking tussen de numerieke simulatiesresultaten van Delphin en WUFI en de meetresultaten voor de vochtsensoren in de losse kalkhennepvulling en de kalkhennepblokken.

De potentiële invloed van de meteogegevens

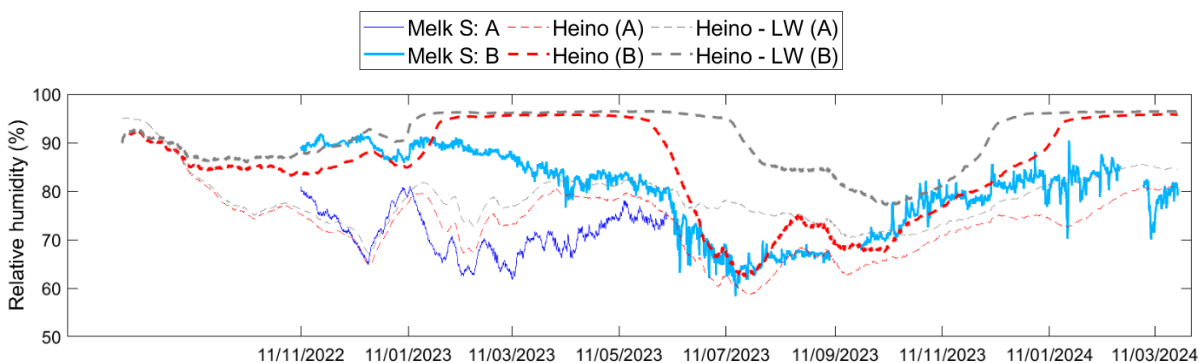
Figuur 13 vergelijkt de relatieve vochtigheid in het kalkhennepvulsel en in de kalkhennepblokken van de referentiesimulatie (met weergegevens van Deelen) met de respons die is verkregen op basis van de meteodata van het weerstation in Heino. Hoewel beide weerstations zich relatief dicht bij het testgebouw en in vergelijkbaar landelijk gebied bevinden (Deelen 23 km en Heino 26 km hemelsbreed), is er een enorm 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 relatieve vochtigheid in de losse kalkhennep veel hoger dan de gemeten relatieve vochtigheid. De relatieve vochtigheid 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 regenblootstellingsfactor van 0,7 naar 0,5 resulteren de meteogegevens van Deelen nog steeds in een te hoge relatieve vochtigheid. 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 de meteogegevens van Deelen voor WUFI gebruikt.



Figuur 13: Vergelijking tussen de numerieke simulatiere resultaten van Delphin voor de invloed van de meteodata en de regenblootstellingsfactor. A = kalkhennepblokken; B = kalkhennepvulsel; FE = de regenblootstellingsfactor.

De potentiële invloed van langgolvlige straling

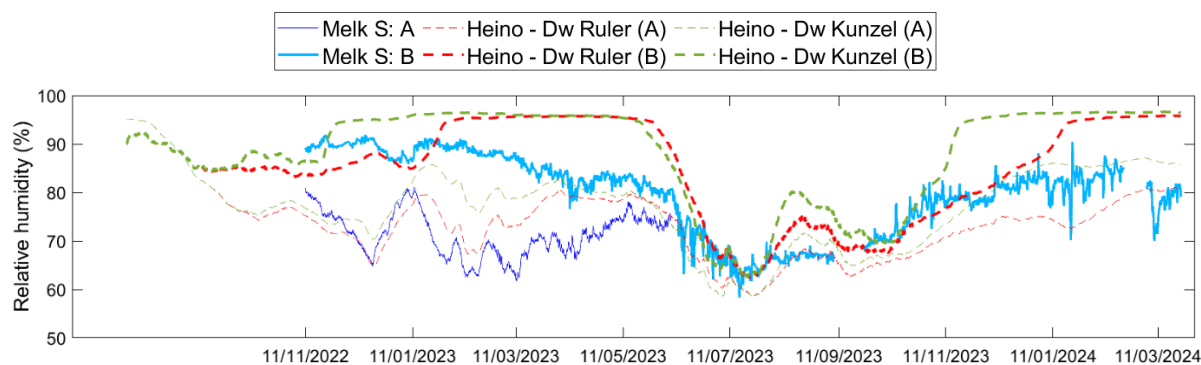
Figuur 14 laat de potentiële invloed zien van langgolvlige straling. Zoals te zien aan de figuur heeft het wel of niet expliciet meenemen hiervan grote invloed op de resultaten terwijl deze data vaak niet aanwezig zijn, ook niet in de weergegevens van veel meteostations.



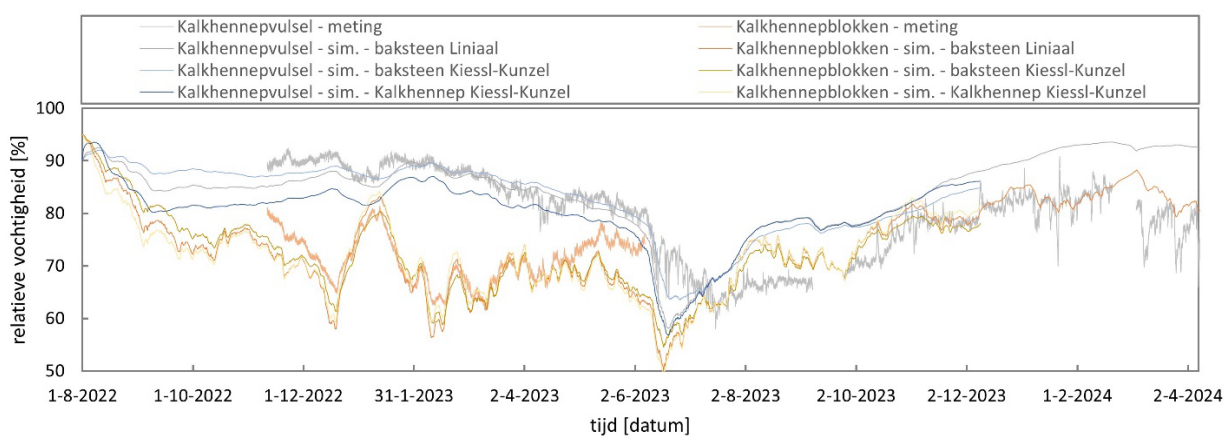
Figuur 14: Vergelijking tussen de numerieke simulatiere resultaten van Delphin voor de invloed van langgolvlige straling. A = kalkhennepblokken; B = kalkhennepvulsel; LW = de langgolvlige straling is expliciet meegenomen.

De potentiële invloed van de materiaaleigenschappen

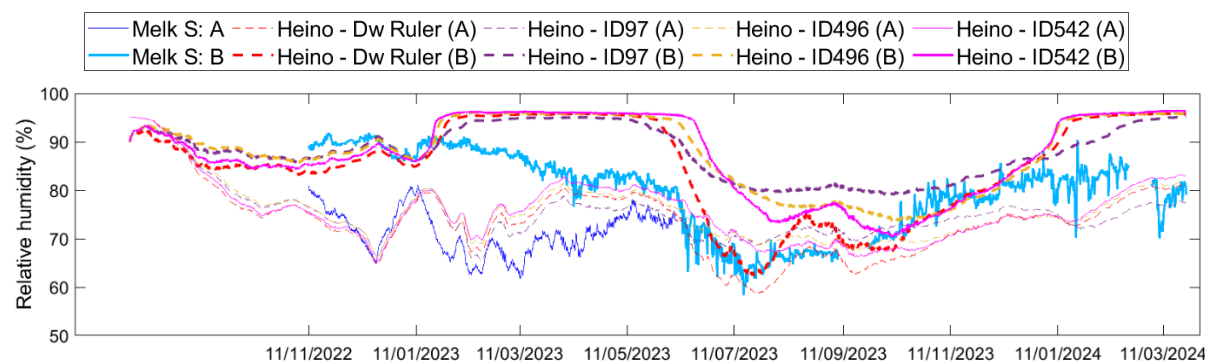
Figuren 15 tot en met 18 tonen de invloed van de materiaaleigenschappen op de hygrothermische respons van de gevel. Zoals te zien in de Figuren 15 (Delphin) en 16 (WUFI) zit er een groot verschil in de uitkomsten bij gebruik van invoer op basis van gedetailleerde meting van de vochttransportcoëfficiënt en op basis van de vereenvoudigde Kießl-Künzel methode. 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 17 (Delphin) en 18 (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 echte baksteen. Dit betekent dan ook dat voor een voldoende betrouwbare simulatie gedetailleerde eigenschappen van de toegepaste materialen benodigd zijn, of, indien deze niet beschikbaar zijn, een probabilistische bandering dient te worden gekozen. Indien dat laatste ook niet mogelijk is, dan dienen zeer zorgvuldig de materialen uit de database gekozen te worden en dient een grote onzekerheidsmarge in acht genomen te worden.



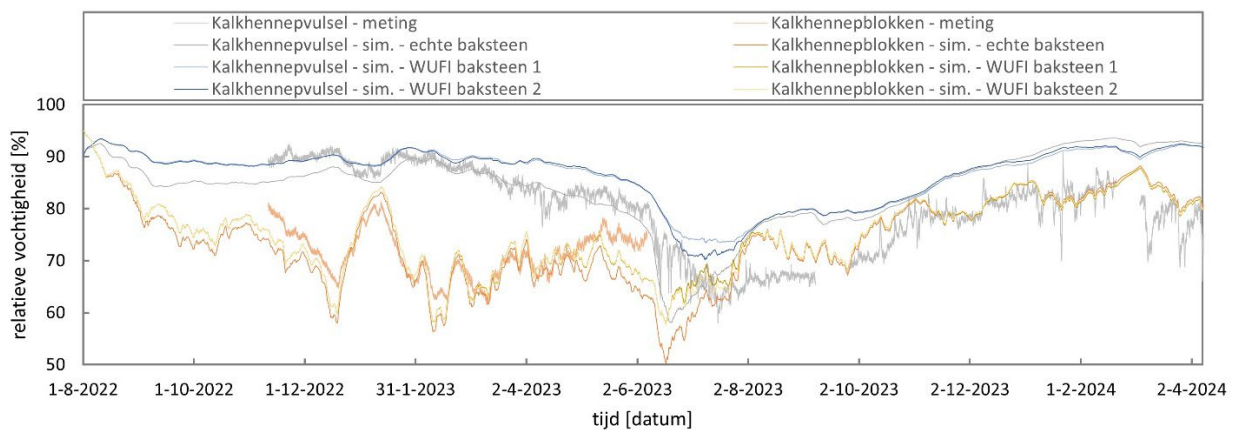
Figuur 15: Vergelijking tussen de numerieke simulatie resultaten van Delphin voor de invloed van de vochttransporteigenschappen van de baksteen: liniaal methode versus vereenvoudigde Kießl-Künzel methode. A = kalkhennepblokken; B = kalkhennepvulsel.



Figuur 16: Vergelijking tussen de numerieke simulatie resultaten van WUFI voor de invloed van de vochttransporteigenschappen van de baksteen: liniaal methode versus vereenvoudigde Kießl-Künzel methode voor baksteen en kalkhennep.



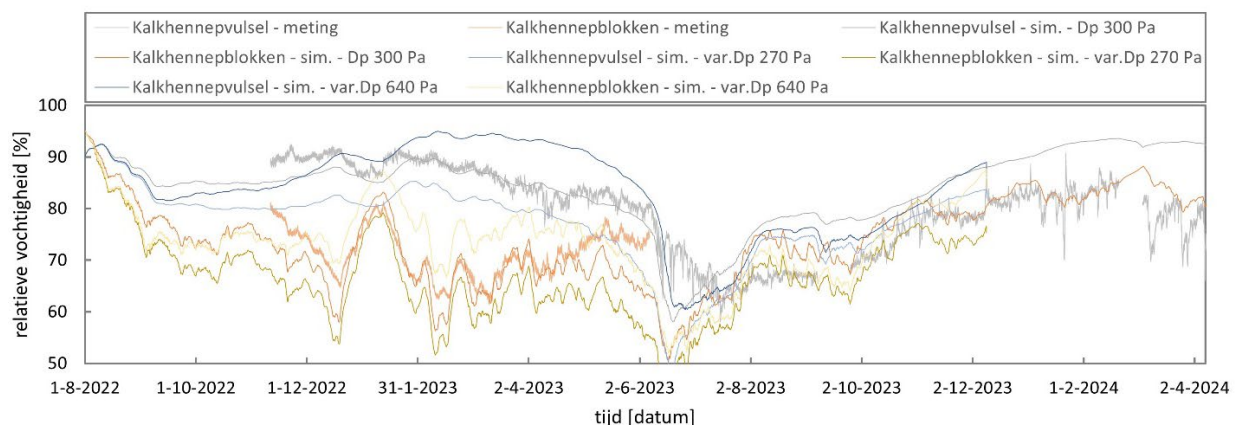
Figuur 17: Vergelijking tussen de numerieke simulatie resultaten van Delphin voor de invloed van de echte baksteen versus bakstenen uit de Delphin database (Tabel 4). A = kalkhennepblokken; B = kalkhennepvulsel.



Figuur 18: Vergelijking tussen de numerieke simulatiere resultaten van WUFI voor de invloed van de echte baksteen versus bakstenen uit de WUFI database (Tabel 4).

De potentiële impact van de binnencondities

Figuur 19 (WUFI) toont de resultaten van de vergelijking van verschillende vochtcondities binnen als randvoorwaarde. Ook hier valt op te maken dat de binnencondities grote invloed hebben op de uitkomsten van de simulatie en dat om die reden bij voorkeur gewerkt wordt met gemonitorde data van binnentemperatuur en luchtvochtigheid.



Figuur 19: Vergelijking tussen de numerieke simulatiere resultaten van WUFI voor de invloed van de binnencondities. Dp 300 Pa = 300 Pa vaste waarde voor de hogere dampspanning binnen; Var.Dp 270 Pa = klasse 1 binnencondities; Var.Dp.640 Pa = klasse 2 binnencondities.

3.3 Besluit en aanbevelingen op basis van de simulaties

Deze simulatiestudie van de hygrothermische respons van een met slagregen belaste zuidgevel met zowel Delphin als WUFI 2D toont dat het zeer lastig is om de simulatiere resultaten voldoende dicht bij de gemeten respons te krijgen. De nauwkeurigheid 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 een belangrijke invloed op de resultaten te hebben, allereerst de slagregenbelasting. Twee KNMI 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. In dit onderzoek waren de slagregenmeters helaas door vorst beschadigd. Daarnaast had ook langgolvlige straling een belangrijke invloed. Deze gegevens zijn vaak echter moeilijk te verkrijgen. Tot slot had de relatieve luchtvochtigheid binnen een belangrijke invloed met name op de materiaallagen aan de binnenzijde van de gevel. Ook hier verdient het aanbeveling om uit te gaan van gemeten data.

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 hierbij 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 na-isolatie 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:

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

4. Algemeen besluit

Het hygrothermisch gedrag van twee concrete renovatieprojecten van historische woongebouwen thermisch gerenoveerd met binnenisolatie werd via een uitgebreide meetcampagne opgevolgd. Uit de metingen bleek dat in beide gevallen de werkelijke prestaties niet helemaal overeenkomen met de gewenste. Dit toont het belang van een multidisciplinaire aanpak waarbij bij voorkeur kennis van een architect, een bouwhistoricus, een bouwfysicus en een aannemer samengevoegd wordt. Enkel door het isolatievraagstuk multidisciplinair aan te pakken, kan bouwfysische schade maximaal vermeden worden. Bovendien is het daarbij 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 simulatie leren we 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 uitkomsten blijken sterk gevoelig voor de invoer van de binnen- en buitencondities, met name slagregenbelasting, langgolvlige straling en de vochtcondities binnen. Daarnaast hebben ook de ingevoerde materiaaleigenschappen invloed op de uitkomsten. Het gebruik van opgemeten condities en eigenschappen is daarom sterk aan te bevelen. Indien deze niet beschikbaar zijn, dan dienen we zeer

voorzichtig te zijn met het inschatten van vochtgerelateerde risico's puur alleen op basis van deze simulaties. In zo'n geval is een probabilistische aanpak aan te bevelen.

TAKE-AWAYS

- **Na-isolatie vraagt om een multidisciplinaire aanpak waarbij de kennis van een architect, een bouwhistoricus, een bouwfysicus en een aannemer betrokken dient te worden.**
- **Na-isolatie vraagt om systeemdenken.**
- **Bij numerieke simulaties hebben de invoergegevens (materiaaleigenschappen en het buiten- en binnenklimaat) een belangrijk impact op de resultaten.**
- **Het gebruik van gemeten 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, waarmee de variaties in ontwerpkeuzes en onzekerheden in invoergegevens worden gesimuleerd, wenselijk of noodzakelijk, en dienen onzekerheden in acht genomen te worden.**

5. Referenties

- [1] project in opdracht van de Rijksdienst voor Cultureel Erfgoed Nederland: Energetische prestaties van massieve bakstenen gevels in woonhuismonumenten.
<https://www.monumentenkennis.nl/52/kennis/lopend-onderzoek.html>
- [2] Hens, H, 2011. Applied Building Physics. 1ste druk, Ernst & Sohn, Berlijn.
- [3] H. Künzle, "Simultaneous heat and moisture transport in building components," Fraunhofer IRB Verslag Stuttgart, 1995.
- [4] P. Ren, C. Feng, and H. Janssen, "Hygric properties of porous building materials (V): Comparison of different methods to determine moisture diffusivity," Building and Environment, vol. 164, 106344, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106344.
- [5] ISO, ISO 15927-3. Hygrothermal Performance of Buildings-Calculation and Presentation of Climatic Data-Part 3: Calculation of a Driving Rain Index for Vertical Surfaces from Hourly Wind and Rain Data, 2009.
- [6] ASHRAE, ASHRAE 160. Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings, 2016.
- [7] J.F. Straube, E.F.P. Burnett, Simplified prediction of driving rain on buildings, in: Proceedings of the International Building Physics Conference, 18, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, the Netherlands, 2000. No. 21.09.

- [8] ISO, ISO 13788. Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods, 2012.

HOUTEN BALKKOPPEN EN BINNENISOLATIE: RISICO'S EN AANDACHTSPUNTEN

Marc Stappers, RCE; Evy Vereecken, KU Leuven en Jill Vervoort, RCE

Samenvatting

Een grote bezorgdheid bij het aanbrengen van binnenisolatie is de degradatie van houten balkkoppen. Ten gevolge van de plaatsing van binnenisolatie verandert de vochtthuishouding van de metselwerk gevel immers. Een hoger vochtgehalte, met een verhoogd risico op schimmeligroei en houtrot tot gevolg, kan optreden. Dit risico hangt samen met de vochtbronnen, welke van buitenaf (bijvoorbeeld slagregen, opstijgend grondvocht) en van binnenuit (convectief vochttransport bij de afwezigheid van een luchtdichte aansluiting) kunnen optreden. Deze bijdrage bespreekt de voornaamste vochtbronnen die een impact hebben op de vochtthuishouding in de gevel. Vertrekkende van deze vochtbronnen en het hiermee gepaarde vochtgedrag rond de balkkop, bespreekt deze bijdrage enkele maatregelen en/of vereisten om het vochtgehalte in de metselwerk gevel te beperken.

1. Inleiding

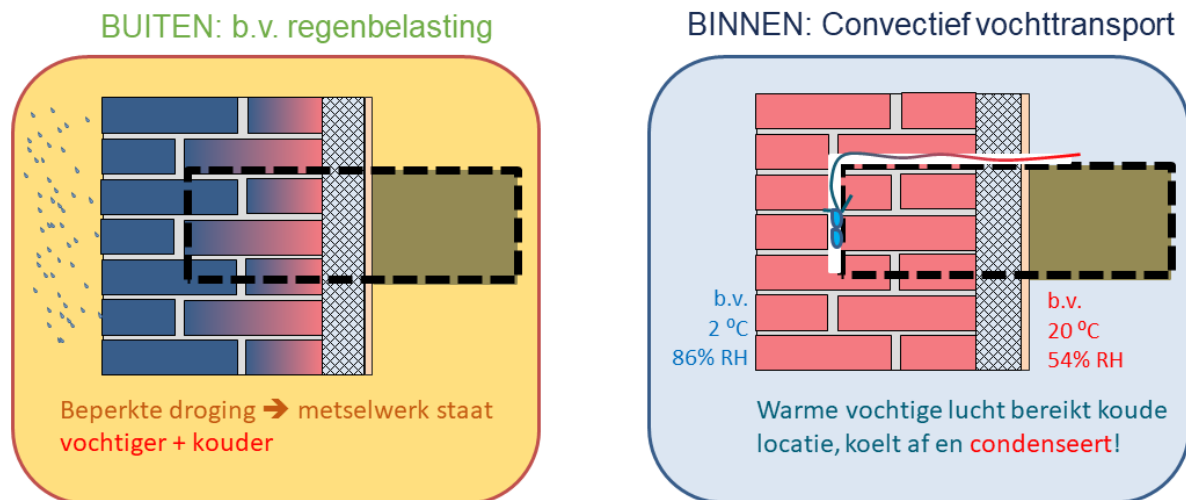
Het gros van de historische gebouwen in Nederland daterend van vóór 1920 beschikt over houten vloerbalken die in de gevels zijn opgelegd. Bij het aanbrengen van een binnenisolatiesysteem moet de nodige aandacht geschonken worden aan het vermijden van bouwphysische risico's rondom deze balkkoppen. De reden daarvoor is tweeledig. Allereerst hebben balken een constructieve functie bij de stabiliteit van een gebouw. Daarnaast bezitten balkkoppen ook veel monumentale waarden en informatie wat betreft onder andere de ouderdom en bouwwijze. Het vermijden van degradatie van de houten vloerbalken is dus uiterst belangrijk. In deze bijdrage wordt dieper ingegaan op de verschillende vochtbronnen en het effect daarvan op het vochtgedrag rondom vloerbalken opgelegd in massieve metselwerk gevels, de wijzen waar degradatie plaats kan vinden en de verschillende manieren om het risico op schade te beperken of te vermijden. De detaillering van bouwknopen met houten vloerbalken vormt tevens een uitdaging (Figuur 1), doch dit valt buiten het bereik van deze studie. Voor meer info hieromtrent wordt verwezen naar (Dobbels 2017).



Figuur 1: Het na-isoleren rond balkkoppen kent in de praktijk een aantal uitdagingen, zoals het luchtdicht laten aansluiten van de isolatie (a) met behulp van een metalstud hulpconstructie op de balk. Bij balken met muurstijl, korbek en sleutelstuk (b) betekent aanbrengen van een binnenisolatiesysteem ook een mogelijk verlies aan monumentale waarden.

2. Vochtbronnen

De instandhouding van houten balkkoppen is afhankelijk van het materiaalvochtgehalte ervan. Is dat langdurig hoger van 20 massa-% dan is er kans op aantasting door houtaantastende schimmels (en eventueel houtaantastende insecten). Maar ook bij een historisch gezien gunstige vochtthuishouding kan het aanbrengen van een binnenisolatiesysteem dit evenwicht ongunstig veranderen. Om dat risico goed in te kunnen schatten, is het nodig om door middel van inspectie inzicht in de bijdrage van de mogelijk vochtbronnen buiten en binnen te krijgen (Figuur 2).



Figuur 2: De invloed van vochtbronnen van buiten en van binnen hebben een grote invloed op het materiaalvochtgehalte van de in het metselwerk opgelegde balkkop.

2.1 Buitenomgeving

2.1.1 Slagregen en vochtdoorslag

De buitenzijde van de gevel kan blootgesteld zijn aan slagregen. In Nederland en Vlaanderen is de heersende windrichting Zuid-West, waardoor zuidwest-georiënteerde gevels ook de hoogste slagregenbelasting ondervinden. Aan regen blootgestelde gevels kunnen heel wat vocht opnemen, welk dieper in de wand getransporteerd kan worden en bijgevolg de houten balkkoppen kan bereiken. De dikte van de muur, de eigenschappen van de bakstenen en mortelvoegen (onder andere de capillaire absorptiecoëfficiënt), alsook de kwaliteit van het metselwerk (bijvoorbeeld de aanwezigheid van scheuren) spelen een belangrijk rol bij het transport van regenwater naar binnen toe.

2.1.2 Optrekkend vocht

Voor de begane grond kan het zijn dat de balken zijn opgelegd in een zone die onder invloed staat van optrekkend vocht. Een draagvloer uit hout op het gelijkvloers vormt een kritische situatie (Dobbels, 2017).

2.1.3 Lekkage van goten en hemelwaterafvoeren

Voor de balken van de zoldervloer is het belangrijk dat goten het regenwater goed kunnen verwerken. Een verstopte hemelwaterafvoer heeft als gevolg dat goten kunnen overlopen wat bij slecht onderhoud of slechte detaillering leidt tot nat metselwerk en daarmee natte balkkoppen. Daarnaast kunnen lekkende hemelwaterafvoeren ter plaatse van verdiepingen ook

resulteren in het vochtig worden van houten balkkoppen op de verdiepingen. Goed onderhoud is vereist om dit te voorkomen.

2.2 Binnenomgeving

Bij veel restauratieprojecten wordt veel aandacht geschonken aan het vermijden van inwendige condensatie door dampdiffusie (zie bijdrage Binnenisolatiesystemen: werking, consequenties en aandachtspunten). De hoeveelheid waterdamp die daarmee de constructie binnen kan dringen kan in sommige gevallen leiden tot schade, maar vaak is het maar een fractie van de hoeveelheid waterdamp die door convectief damptransport de constructie binnen kan dringen. Om de dampstroom door diffusie vanuit de binnenruimte in de constructie te beperken en inwendige condensatie te voorkomen is het belangrijk om in sommige systemen een dampremmende laag aan te brengen (zie de A1-, A2- en B1-systemen in *Binnenisolatiesystemen: werking, consequenties en aandachtspunten*). Een uitzondering hierop vormen de C2- en C3-systemen, waarbij inwendige condensatie in het isolatiesysteem kan gebufferd worden en deels terug naar de binnenomgeving kan getransporteerd worden. Convectief damptransport kan tijdens het stookseizoen bij elk van de binnenisolatiesystemen optreden wanneer warme vochtige lucht vanuit de binnenruimte via kieren de balkkop kan bereiken. Ten gevolge van een binnenisolatiesysteem zullen het metselwerk en de opgelegde balkkoppen tijdens de winterperiode immers kouder komen te staan. Wanneer warme vochtige lucht vanuit de binnenruimte via kieren de balkkop kan bereiken, zal de lucht bijgevolg afkoelen wat leidt tot een hogere relatieve vochtigheid of zelfs tot condensatie tegen de balkkop. Dit kan worden vermeden door de aansluiting van het binnenisolatiesysteem op de bestaande binnengevels, vloeren, plafonds, etc. alsook de aansluiting met de vloerbalken, luchtdicht uit te voeren en holtes achter het isolatiesysteem te voorkomen (voor meer info zie 5.2). Dit geldt voor alle systemen.

3. Het vochtgedrag rondom balkkoppen¹

3.1 Zonder isolatie, bestaande situatie

Bij balkkoppen opgelegd in dunne gevels met een zuidwest oriëntatie zal slagregen voor een groot gedeelte het vochtgehalte in het metselwerk en daarmee in de balkkop bepalen. In dikkere gevels met balkkoppen die niet al te diep zijn opgelegd, zal slagregen een minder groot probleem zijn. In beide gevallen kan droging naar binnen en buiten plaatsvinden. Is de bestaande balkkop in goede staat, dan kent de vochthuishouding een gunstige balans. Vertonen de houten balkkoppen opgelegd in de niet-geïsoleerde gevel reeds tekenen van schade, dan moet de oorzaak van deze schade eerst bekeken en opgelost worden alvorens de plaatsing van een binnenisolatiesysteem kan overwogen worden.

3.2 Met isolatie: dampremmend binnenisolatiesystemen (A1, A2, en B1)

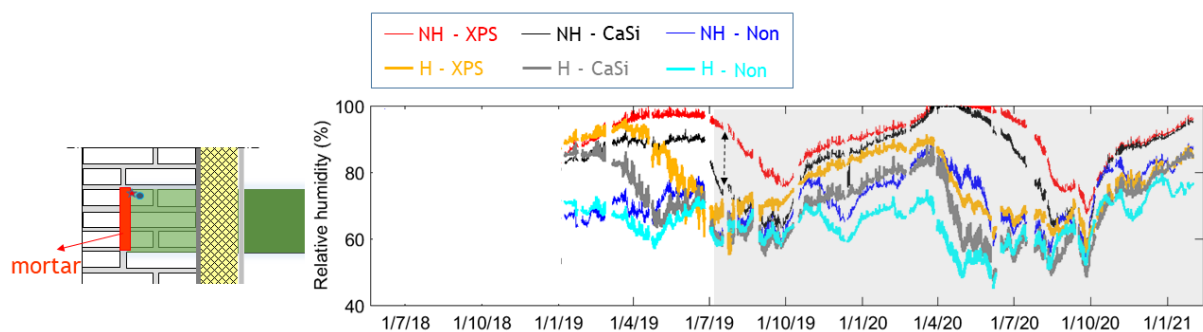
Door het toepassen van een binnenisolatiesysteem verandert deze vochtbalans. Enerzijds omdat het metselwerk kouder wordt. Anderzijds omdat het drogingspotentieel naar binnen toe afneemt. Bij het toepassen van een dampremmend binnenisolatiesysteem is dat laatste evident. De kans dat het vochtgehalte van het metselwerk en daarmee het vochtgehalte in de houten balkkop toeneemt, is daardoor (bij slagregenbelaste gevels) zeer waarschijnlijk. Bij de houten balkkoppen is de toename van de relatieve vochtigheid vooral zichtbaar in het

¹ Vanwege het lastig te voorspellen gedrag van binnenisolatiesysteem B2 en C2 zijn deze hier buiten beschouwing gelaten. En omdat C1-systemen doorgaans ook sterk worden afgeraden, zijn ook deze buiten beschouwing gelaten.

voorjaar en (voor de houten balkkoppen die in contact komen met mortel) in de zomer (E. Vereecken and Roels 2021).

3.3 Met isolatie: dampopen capillair actief binnenisolatie (C3)

Om het probleem met de vermindering van het droogpotentieel te verkleinen, is een oplossing gevonden in het dampopen capillair actief isoleren. Doordat het materiaal dampopen is, kan er mogelijks inwendige condensatie ontstaan. Door de vochtbuffering en capillaire werking kan deze eenvoudig door het isolatiemateriaal worden opgenomen en naar de warme zijde (binnenoppervlak) getransporteerd worden. Dat voorkomt dat het metselwerk door inwendige condensatie nat wordt en dat het vochtgehalte in de balkkop toeneemt. Iem kan vocht ten gevolge van een regenbelasting bij dampopen capillair actieve binnenisolatiesystemen makkelijker naar het binnenoppervlak uitdrogen, waardoor het vochtgehalte in het metselwerk lager ligt dan bij dampdichte (A1, A2 en B1-systemen). Echter dient opgemerkt te worden dat een dampopen capillair binnenisolatiesysteem niet altijd garandeert dat een voldoende laag vochtgehalte in de metselwerk gevel en de houten balkkoppen bekomen wordt. Zoals weergegeven in Figuur 3 kan, ondanks de lagere relatieve vochtigheid ten opzicht van de situatie bij dampdichte systemen, de relatieve vochtigheid nog steeds aan de hoge kant liggen. Het beperken van de regenbelasting heeft een meer uitgesproken impact dan de keuze van het binnenisolatiesysteem.



Figuur 3: Relatieve vochtigheid ter plaatse van de balkkop als een functie van de tijd bij een niet-geïsoleerde wand ('Non'), een wand met geëxtrudeerd polystyreen als binnenisolatie ('XPS', A1-systeem) en een wand met calciumsilicaat binnenisolatie ('CaSi', C3-systeem), en dit voor een niet-gehydrofobeerde (NH) en gehydrofobeerde (H) metselwerk wand. Opmerking: de periode tot ongeveer 1/7/19 wordt nog beïnvloed door vocht in het metselwerk ten gevolge van het aanbrengen van de hydrofobering (E. Vereecken and Roels 2021).

4. Beperken van het risico

4.1 Reductie van de vochtopname via de metselwerkwand

In eerste instantie moet de vochtbelasting via de metselwerkwand (zie de vochtbronnen weergegeven in 2.1. Buitenomgeving) beperkt worden. Optrekkend vocht moet aangepakt worden alvorens een binnenisolatiesysteem geplaatst wordt en dit ook wanneer geen houten balkkoppen aanwezig zijn. Optrekkend vocht kan op verschillende manieren bestreden worden, zoals door het injecteren van het metselwerk, maaiveldichting en drainage. Daarnaast vormt de slagregenbelasting een vochtbron met een grote impact op het vochtgedrag (zoals ook bleek uit Figuur 3). Om de invloed van slagregen te beperken, kan een hydrofobering, met al zijn mitsen en maren, een oplossing bieden en de relatieve luchtvochtigheid in de gevel verlagen. In Nederland wordt hydrofobering slechts toegepast onder bepaalde voorwaarden (Hunen, van 2007):

- » De gevel moet in goede bouwkundige staat verkeren;
- » Het materiaal in de gevel moet homegeen van aard zijn;
- » Het hydrofobeermiddel moet voldoende aanslaan;
- » De gevel mag niet nat zijn;
- » De gevel mag geen zouten bevatten.

Een andere optie om de regenopname te reduceren is het toepassen van een kalei- of pleisterlaag. Deze optie is vergevingsgezinder wat betreft mogelijk defecten van de kalei-/pleisterlaag, maar wijzigt het uiterlijk van de gevel, waardoor het vaak niet toegestaan wordt.

De reductie van de regenopname heeft een grotere invloed op de mogelijke reductie van het vochtgehalte en de relatieve vochtigheid in de wand en houten balkkop dan de keuze van het binnenisolatiesysteem (Vereecken and Roels 2021).

4.2 Luchtdichtheid

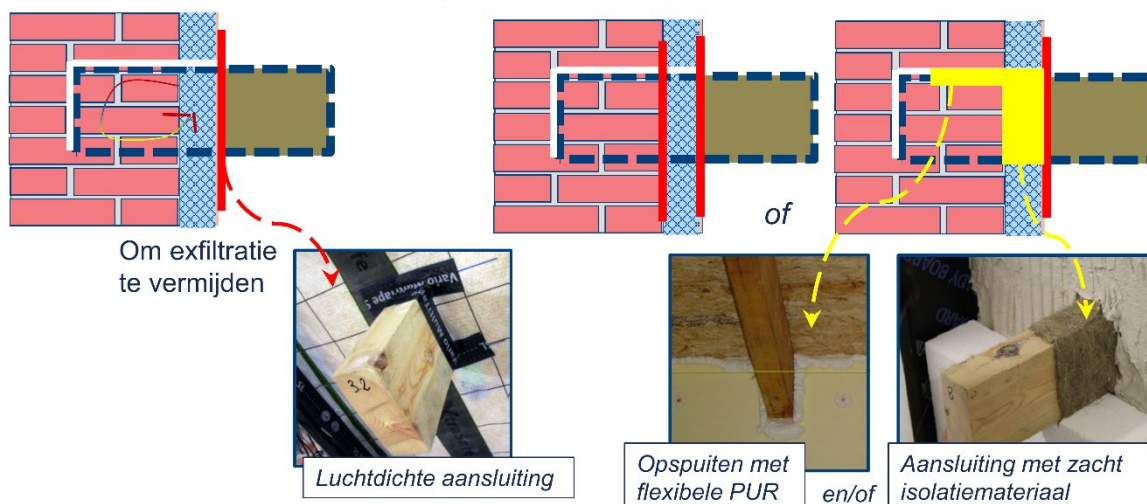
4.2.1 Bij de aansluiting van het isolatiesysteem op de balk

Daar waar de balk isolatiesysteem doorboort is luchtdichting nodig. Een luchtdichte aansluiting tussen de vloerbalken en het binnenoppervlak van de gevel is van uiterst belang. Daarnaast wordt aanbevolen om ook luchtrotaties rond de balkkop te vermijden, dit laatste is zeker het geval bij isolatiesystemen die op het metselwerk verlijmd worden en dampopen zijn (zoals C2 en C3). Luchtrotaties rond de balkkop kunnen vermeden worden door een dubbele kierdichting aan te brengen (Figuur 4):

1. In het vlak van isolatiemateriaal en metselwerk;
2. In het vlak van het isolatiemateriaal en de binnenafwerking (Peper et al. 2014; Evy Vereecken and Roels 2017).

Geschikte materialen daarvoor zijn diverse soorten tape, dikke (bio-)bitumineuze coating, gegoten gipspleister, etc. (Peper et al. 2014; Ruisinger 2019). Een optie om de luchtrotaties rond de balkkop tegen te gaan is het plaatsen van bijvoorbeeld een zacht isolatiemateriaal (minerale wol, hennep,...) dat goed aansluit op de balken (Figuur 4). Merk op dat het zoveel mogelijk vermijden van contact tussen de balkkop en het metselwerk is gunstig, aangezien zo het vochttransport van het metselwerk naar de balkkop bemoeilijkt wordt (E. Vereecken and Roels 2021; Ruisinger 2019).

Voorzie een luchtdichte aansluiting **en...** vermijd luchtrotaties



Figuur 4: Door middel van een luchtdichte aansluiting tussen de wand en de vloerbalk en het vermijden van luchtrotaties wordt convectief vochttransport en de daarmee gepaarde risico's vermeden.

4.2.2 Van de balk zelf

Houten balken in historische gebouwen zijn zelden zonder scheuren. Dat betekent dat, ondanks dat de aansluitingen van het isolatiesysteem op de balk luchtdicht is uitgevoerd, er door deze scheuren alsnog convectief damptransport zou kunnen plaatsvinden. Het is dus belangrijk om de scheuren van dat deel van de balk dat in het isolatiesysteem steekt te dichten. Geschikte materialen daarvoor zijn, dikke (bio-)bitumineuze coating, gegoten gipspleister, etc. (Peper et al. 2014) of deuvels (Ruisinger 2019).

4.2.3 Controle tijdens en na de uitvoering

Daar de luchtdichtheid nogal nauw komt, moet de uitvoering hiervan voordat de wand 'gesloten' wordt gecontroleerd worden. Dat geldt voor de isolatie en de dampremmende lagen in het algemeen en voor de aansluiting op de balkkop in het bijzonder. Wanneer pas achteraf, door middel van een blowerdoortest, wordt vastgesteld dat de luchtdichting onvoldoende is, zal het verbeteren van de luchtdichtheid moeilijk zijn en leiden tot meerwerk en vertraging of een ongewenst groter energieverlies. Zorg daarom in het uitvoeringsproces dat dit sluitprotocol onderdeel is van het bouwproces.

4.3 Zone rondom de balkkoppen niet isoleren

Een in Nederland momenteel veel toegepaste preventieve maatregel is het vrijhouden van isolatie van een zone rondom de balkkop. Bij dampremmende binnenisolatiesystemen moet de folie wel doorgezet worden tot aan de balkkop. De gedachte hierachter is dat door het ontbreken van de isolatie de binnenruimte het metselwerk en de daarin opgelegde balkkop kan opwarmen. Hierdoor wijzigt het temperatuurprofiel ter plaatse van de balkkop niet of nauwelijks (ten opzichte van de situatie zonder binnenisolatie) en is de gedachte dat daarmee ook het vochtprofiel beperkt wijzigt en degradatie wordt vermeden. Inmiddels zijn er diverse onderzoeken die dit ook bevestigen (Spierenburg 2017; Harrestrup and Svendsen 2016; Jensen et al. 2021; Odgaard 2019).; verder onderzoek hier rond is echter nodig. Doordat bewust een koudebrug wordt gecreëerd, is de potentiële energiesparing wel veel geringer.

4.4 Lokaal verwarmen

Een andere optie is het heel lokaal verwarmen van de balkkop, maar dit is in Nederland niet heel gebruikelijk. In Duitsland en Oostenrijk wordt dat vaker gedaan (Gnoth et al. 2003; Wegerer and Bednar 2018). De gedachte is dat bij ongunstige omstandigheden de temperatuur rondom de balkkop wat wordt verhoogd, waardoor de balkkop droger blijft. Het bepalen van de juist benodigde warmtecapaciteit is maatwerk. Voor Buitenplaats Broekbergen in Driebergen is de effectiviteit van een warmtelint gesimuleerd (Van Heun 2021). Het bleek dat aanbrengen van het lint in het midden van de balk het meest effectief is, maar ook het meest invasief. Het aanbrengen van het lint onder of boven de balk blijkt iets minder effect maar is wat betreft uitvoerbaarheid veel eenvoudiger. Het gebruik van dergelijke systemen zal onherroepelijk leiden tot een toename van het elektrische energieverbruik.

4.5 Impregneren van de balkkop

In alle gevallen is het aan te bevelen om bij het vervangen van balken de nieuwe balkkop te impregneren.

4.6 Balkkoppen aanhelen met/vervangen door epoxy

Balkkoppen, die aangetast zijn door houtaantastende schimmels, zullen hersteld moeten worden. Soms is dat door het aanlassen van de balkkop met een gelijksoortige/gelijkwaardige houtsoort. Soms wordt gekozen om de balkkop aan te helen met epoxy. In dat geval zal een hogere vochtbelasting van het metselwerk geen invloed meer hebben. Vanuit oogpunt van erfgoedzorg is deze methode alleen te verkiezen als laatste redmiddel.

5. Besluit

Door een binnenisolatiesysteem toe te passen kan het materiaalvochtgehalte van houten balkkoppen toenemen. Een goed begrip van de werking van de verschillende isolatiesystemen (zie *Binnenisolatiesystemen: werking, consequenties en aandachtspunten*) is belangrijk om de gevolgen voor het materiaalvochtgehalte van de houten balkkoppen als gevolg van het na-isoleren in te kunnen schatten. Bij een verhoogd risico is er een aantal maatregelen die kunnen mediëren, maar het belangrijkste blijft het aanpakken van de oorzaak. Het aanpakken van de vochtbronnen, zoals o.a. de regenopname, heeft vaak een belangrijkere impact dan de keuze van het binnenisolatiesysteem.

TAKE-AWAYS

- **Houten vloerbalken in combinatie met binnenisolatie vormen kritische punten aangezien de plaatsing van binnenisolatie een verhoogd vochtgehalte met zich mee kan brengen. Een grondige analyse is nodig alvorens binnenisolatie geplaatst wordt.**
- **Het goed onderhouden en het oplossen van bestaande bouwkundige gebreken is een eerste vereiste. Pas na herstel en voldoende droogtijd kan overgegaan worden tot het aanbrengen van een binnenisolatiesysteem.**
- **Een luchtdichte aansluiting tussen binnenisolatiesysteem en houten vloerbalk is noodzakelijk om convectief vochttransport en de hiermee gepaard gaande vochtproblemen te vermijden. Daarenboven wordt ook aanbevolen om luchtrotaties rond de balkkop tegen te gaan.**
- **De slagregenbelasting kan een grote impact op de vochtcondities in het metselwerk en de balkkoppen hebben. De hoogste slagregenbelasting is te verwachten bij zuidwest georiënteerde gevels. Hoe kleiner de afstand tussen de balkkop en het buitenoppervlak, hoe groter het risico op een hoog vochtgehalte in de balkkop.**
- **Omwille van de grote impact van de slagregenbelasting op risico's als schimmelgroei en houtrot, wordt aanbevolen om de slagregenbelasting - waar mogelijk - zoveel mogelijk te beperken. Het beperken van de slagregenbelasting kan een grotere impact op het vochtgedrag hebben dan de keuze van het binnenisolatiesysteem.**

6. Referenties

Dobbels, Filip. 2017. "Renofase WP4: Coördinatie van doorgedreven stapsgewijze renovatie. Deliverable D4-2: Detaillering van binnenisolatie – Praktijkgids." RenoFase.

Gnoth, Steffen, Frank Hansel, Karsten Jurk, Torsten Toepel, and Peter Strangfeld. 2003. "Hygrothermische Untersuchungen Der Balkenköpfe von Einschubdecken Bei Innengedämmten Aussenwänden Unter Einbeziehung Der Heizungstechnik."

Harrestrup, M., and S. Svendsen. 2016. "Internal Insulation Applied in Heritage Multi-Storey Buildings with Wooden Beams Embedded in Solid Masonry Brick Façades." *Building and Environment* 99 (April):59–72. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.019>.

Hunen, van, Michiel. 2007. "Hydrofoberen van gevels." Rijksdienst voor Archeologie en Cultuurlandschap.

Jensen, Nickolaj Feldt, Søren Peter Bjarløv, Carsten Rode, Birgitte Andersen, and Eva B Møller. 2021. "Hygrothermal Performance of Six Insulation Systems for Internal Retrofitting

Solid Masonry Walls." *Journal of Building Physics* 44 (6): 539–73.
<https://doi.org/10.1177/1744259120988745>.

Odgaard, Tommy Riviere. 2019. *Challenges When Retrofitting Multi-Storey Buildings with Interior Thermal Insulation*. Lyngby: DTU Civil Engineering.

Peper, Søren, Armin Bangert, Zeno Bastian, and Waldemar Rupps. 2014. "Integrating Wood Beams into the Airtight Layer." Darmstadt: Passive house institute.

Ruisinger, Ulrich. 2019. "Das hygrothermische Verhalten von Balkenköpfen bei innen gedämmten Gebäuden." Technische Universität Graz.

Spierenburg, M. 2017. "Heat and Moisture in Wooden Bearings of Monumental Buildings." Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.

Van Heun, Peter. 2021. "Hoofdhuis Broekbergen, dimensionering warmtelint." Climatic Design Consult.

Vereecken, E., and S. Roels. 2021. "Hygrothermal Performance of Internally Insulated Masonry Walls with Embedded Wooden Beam Heads: A Field Study on the Impact of Hydrophobisation." *Journal of Physics: Conference Series* 2069 (1): 012019.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012019>.

Vereecken, Evy, and Staf Roels. 2017. "Wooden Beam Ends in Combination with Interior Insulation: The Importance of an Airtight Sealing." *Energy Procedia* 132 (October):664–69.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.003>.

Wegerer, Paul, and Thomas Bednar. 2018. "Improving Durability of Wooden Beam Bearings in Inside Insulated Walls by Tempering the Beam's Heads." In *Healthy, Intelligent and Resilient Buildings and Urban Environments*, 337–42. International Association of Building Physics (IABP). <https://doi.org/10.14305/ibpc.2018.be-9.03>.

BETROKKEN ONDERZOEKERS IN MONUMENTENKENNIS 2019-2024

Prof. dr. ir. Evy Vereecken

KU Leuven, departement Bouwkunde
Afdeling Bouwfysica en Duurzaam Bouwen

Evy.Vereecken@kuleuven.be

KIK-IRPA

Labo monumenten en monumentale decoratie

Evy.Vereecken@kikirpa.be

Evy Vereecken is een Tenure Track Assistant Professor aan de Afdeling Bouwfysica en Duurzaam Bouwen van KU Leuven en een werkleider aan het Koninklijk Instituut voor Kunstpatrimonium (KIK-IRPA). Zij doet onderzoek naar de preventieve conservatie van erfgoedmonumenten en -collecties met de focus op uitdagingen gerelateerd aan temperatuur en vocht. In 2013 verdedigde ze met succes haar doctoraat getiteld “Hygrothermische analyse van binnenisolatie bij renovatieprojecten”. Daarnaast beschikt zij over een uitgebreide expertise rond onder andere vochtbuffering, materiaalkarakterisatie, inverse modellering en schimmelvoorspellingsmodellen. Zij is ook co-chair van de Unesco PRECOM³OS (Preventive conservation, monitoring and maintenance of monuments and sites) chair.

Ir. Marc Stappers

Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed

m.stappers@cultureelerfgoed.nl

Marc Stappers werkt als bouwfysicus bij de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. Zijn focus ligt op advisering over de effecten van thermische isolatie van historische gebouwen, het binnenklimaat in historische kerken, historische huismusea en musea, en duurzaamheid in de context van cultureel erfgoed. Ook initieert onderzoek op het gebied van hygrothermische prestaties van isolatiesystemen. Hij schreef verschillende praktische brochures over het na-isoleren van historische gebouwen, verduurzaming van kerken en het museale binnenklimaat. Hij is co-auteur van het boek *Managing Indoor Climate Risks in Museums* en co-editor van het boek *Built to Keep*. Ook is hij is (gast)docent bij diverse opleidingsinstituten op het gebied van bouwfysica van erfgoed en museologie. Daarnaast is het lid van de werkgroep Erfgoed van de Koude Oorlog. Van 2014 tot en met 2022 was hij cultuurbeschermingsofficier bij het 1CMICO.

Dr.ir. Martin Tenpierik

Technische Universiteit Delft, Faculteit Bouwkunde

Afdeling Architectural Engineering + Technology, Sectie Environmental and Climate Design

m.j.tenpierik@tudelft.nl

Martin Tenpierik is universitair hoofddocent Bouwfysica aan de faculteit Bouwkunde van de Technische Universiteit Delft, alwaar hij ook de bouwfysicagroep leidt. Hij is voormalig bestuurslid van de Nederlands-Vlaamse Bouwfysica Vereniging (2010-2016) en voormalig hoofd van de sectie Environmental & Climate Design (Bouwkunde, TU Delft; 2016-2022). Daarnaast is hij sinds 2004 geregistreerd als architect in Nederland. Inmiddels heeft hij meer dan 100 artikelen in wetenschappelijke tijdschriften en op congressen gepubliceerd, diverse symposia/congressen georganiseerd en 80 afstudeerstudenten en 15 promovendi begeleid. Zijn onderzoek richt zich op het ontwikkelen van responsieve en adaptieve gebouwssystemen om gebouwen passief energiezuinig en comfortabel te maken (warmte, vocht, lucht en geluid). Speciale aandacht gaat hierbij uit naar slimme en innovatieve bouwmaterialen, slimme duurzame ontwerpconcepten en simulatieprocessen.

Ir. Nanette de Jong

Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed

n.de.jong@cultureelerfgoed.nl

Nanette de Jong werkte de afgelopen 15 jaar als adviseur in Fryslân en Noord-Holland-Noord. Sinds 2024 is zij coördinator voor het Caribisch Gebied. Het is haar streven om het karakter, de beleving en het patina van historische panden zoveel mogelijk intact te laten. En te voorkomen dat bij na-isolatie deze aspecten verloren gaan en het interieur in een nieuwbouw situatie verandert. Nanette is lid van het Programma Management Team van MonumentenKennis, tevens is zij raadslid bij ICCROM.

Prof. dr. ir.-arch. Staf Roels

KU Leuven, departement Bouwkunde

Afdeling Bouwfysica en Duurzaam Bouwen

gustaaf.roels@kuleuven.be

Staf Roels is gewoon hoogleraar aan de Afdeling Bouwfysica en Duurzaam Bouwen van de KU Leuven. Hij is afgestudeerd als ir-architect aan de universiteit van Leuven, waar hij ook zijn doctoraat behaalde. Staf doceert de vakken toegepaste bouwfysica en prestatiegericht ontwerpen. Zijn onderzoek richt zich op warmte-, lucht- en vochttransport in bouwmaterialen en de hygrothermische prestaties en duurzaamheid van bouwdelen. Daarbij komen zowel geavanceerde numerieke als experimentele technieken aan bod. Momenteel heeft Staf Roels een leidende rol in verschillende nationale en internationale onderzoeksprojecten rond warmte- en vochtgedrag van bouwdelen en rond het beoordelen van de werkelijke (energetische) prestaties van gebouwen. Daarnaast is hij een van de mede-oprichters van CHARP, een spin-off van de KU Leuven die zich richt op een accurate real-time monitoring van kunstcollecties in musea en depots (www.charp.be). Hij is ook een van de projectleiders van het ConstrucThor-project, een living lab voor klimaatneutraal bouwen dat momenteel wordt opgericht op de Thorsite in Genk (www.constructhor.be).

Jill Vervoort

Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed

j.w.p.vervoort@cultureelerfgoed.nl

Jill Vervoort werkt als projectleider in het programma Erfgoed & Duurzaamheid bij de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. In de periode 2018 tot en met 2023 was ze actief als duurzaam monumentenadviseur en bouwfysicus bij de verduurzaming van historische woonhuizen, scholen, religieuze gebouwen. Deze praktijkervaring zet ze in haar huidige rol in voor doelgerichte kennisontwikkeling en kennisborging ten aanzien van duurzaamheidsmaatregelen en duurzame transitie in de erfgoedsector. De thematiek die hierbij aan bod komt varieert van bouwfysica en installatietechniek tot warmte- en circulaire transitievraagstukken.

Dr.ir. Wido Quist

Technische Universiteit Delft, Faculteit Bouwkunde

Afdeling Architectural Engineering + Technology, sectie Heritage & Architecture

w.j.quist@tudelft.nl

Wido Quist is universitair hoofddocent historische bouwmaterialen en restauratie-geschiedenis. Hij leidt de sectie Heritage & Architecture aan de faculteit Bouwkunde van de TU Delft. Hij is secretaris van Docomomo International en voorzitter van Docomomo Nederland. Sinds 2022 is hij - samen met Uta Pottgiesser - hoofdredacteur van het SCOPUS geïndexeerde Docomomo Journal. Hij is lid van de facultaire loopbaancommissie en is leerlijntrekker van de Ontwerpen-leerlijn in het bachelor curriculum. Wido is een betrokken leider, is actief geweest in veel verschillende nationale en internationale onderzoeks- en onderwijsprojecten en heeft veel gepubliceerd op het gebied van bouw- en restauratiegeschiedenis, herbestemming en modern erfgoed. Zijn onderzoek en onderwijs zijn gericht op het behoud en hergebruik van het gebouwde erfgoed van de 20e eeuw, waarbij hij de specialistische disciplines met elkaar verbindt. Hij verweeft waarden, ontwerp en techniek en is een expert op het kruispunt tussen historische kennis van moderne bouwmaterialen en strategieën voor behoud en hergebruik. Wido is lid van het Programma Management Team van MonumentenKennis.

Dr. ir. Zara Huijbregts

Technische Universiteit Delft, Faculteit Bouwkunde

Afdeling Architectural Engineering + Technology, Sectie Environmental and Climate Design

z.huijbregts@tudelft.nl

Zara Huijbregts studeerde Bouwkunde aan de Technische Universiteit Eindhoven en promoveerde in 2017 op onderzoek naar de invloed van klimaatverandering op het binnenklimaat van monumentale gebouwen en museale collecties. Daarna werkte zij enkele jaren in de praktijk als bouwfysisch adviseur. Sinds 2020 is zij werkzaam als onderzoeker bouwfysica en erfgoed en docent klimaatontwerp aan de faculteit Bouwkunde van de Technische Universiteit Delft. Binnen het project 'MonumentenKennis' brengt zij de thermische prestatie en luchtdichtheid van monumentale woningen met massief baksteenmetselwerk in kaart. Daarnaast onderzoekt zij hoe verduurzamingsmaatregelen in monumentale gebouwen ingezet kunnen worden voor de verbetering van energie-efficiëntie

en comfort met behoud van cultuurhistorische waarden en adviseert ze monumenteigenaren op het gebied van verduurzaming en binnenklimaatverbetering.

Monumenten kennis

Het instandhouden van monumenten vraagt om specialistische kennis van materialen en gebouwen, de wijze waarop ze aangetast worden, en hoe dit tegen gegaan kan worden. Alleen met deze kennis blijft gebouwd erfgoed behouden voor de samenleving, met alle daaraan verbonden waarden.

In de eerste fase van MonumentenKennis hebben TNO, de TU Delft en de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed hun kennis op dit terrein gebundeld. Deze programmatische samenwerking vond plaats van 2015 tot 2019. De programmatische samenwerking is in 2019 voortgezet tussen TU Delft, KU Leuven en de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. Gezamenlijk voeren we onderzoek uit om gebouwd cultureel erfgoed nog beter te bewaren. Dit onderzoek is bedoeld om aantasting beter te begrijpen en te komen tot betere conservering en restauraties. De samenwerking is er ook om onze kennis beter direct toegankelijk te maken voor professionals in het veld.

We bundelen onze inhoudelijke kennis in onderzoek ten behoeve van de instandhouding van gebouwd erfgoed en verspreiden kennis op dat gebied. In de tweede periode van de samenwerking, 2019-2024, ligt de nadruk op het doen van onderzoek naar energetische prestaties van massieve bakstenen gevels in woonhuismonumenten. De onderdelen van het onderzoek zijn:

- Bepaling van de isolatiewaarde van massief baksteenmetselwerk
- Bepaling van de luchtdichtheid van woningen
- Karakterisering van historische bakstenen
- Effecten van na-isolatie

In de eerste periode van de samenwerking, 2015-2018, bestond het programma uit drie onderdelen:

- Natuursteen
- Moderne materialen
- Kennisontsluiting

Om kennis niet alleen aan te bieden, maar mensen ook te helpen deze te gebruiken, hebben we het Monument Diagnose en Conservering Systeem (MDCS) ontwikkeld. MDCS is de online schade-expert voor monumentale gebouwen. Het helpt bij het vinden van de juiste terminologie, bevat veel achtergrondinformatie in de vorm schadeatlassen en een wiki en biedt de gebruiker ondersteuning bij visuele monitoring en verwerking van inspectieresultaten. We werken continue aan de uitbreiding van de in MDCS opgenomen informatie.

www.monumentenkenis.nl

Voor woonhuismonumenten is binnenisolatie vaak de enige manier om de thermische prestatie van het massief metselwerk te verbeteren. Maar tegenvallende isolatiewaardes, vorstschade, schimmelgroei of houtrot van ingewerkte houten balken liggen op de loer. De veelheid aan isolatiesystemen, die elk pretenderen dé oplossing te zijn, maakt het voor eigenaren moeilijk om te besluiten of na-isolatie een veilige keuze is voor hun gebouw en welk systeem dan de voorkeur geniet.

In deze syllabus, die wordt uitgegeven bij het symposium op 20 november 2024 met als titel Energetische prestaties van massieve baksteengevels in woonhuismonumenten, wordt verslag gedaan van het onderzoek dat in de periode 2019-2024 is gedaan naar massief baksteenmetselwerk. Het onderzoek vond plaats in de context van de programmatische samenwerking MonumentenKennis (fase 2).

In het onderzoek is samengewerkt door secties Heritage & Architecture en Environmental and Climate Design van de Faculteit Bouwkunde, TU Delft, de afdeling Bouwfysica van de KU Leuven en de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. Het project is gefinancierd binnen de Kaderregeling van het Ministerie van OCW.

Deze syllabus vormt een inhoudelijke afronding van het project en bestaat uit vijf bijdragen:

- Binnenisolatiesystemen: werking, consequenties en aandachtspunten
- Karakterisering van historische bakstenen op basis van laboratoriummetingen
- Praktijkmetingen van de thermische prestatie en luchtdichtheid in monumentale woningen
- Na-isolatie van historisch baksteenmetselwerk: in-situ monitoring en simulatie van twee casussen
- Houten balkkoppen en binnenisolatie: risico's en aandachtspunten

Met medewerking van Evy Vereecken, Huub van de Ven, Jill Vervoort, Marc Stappers, Nanette de Jong, Martin Tenpierik, Staf Roels, Wido Quist en Zara Huijbregts