

Molengraaffsingel 8
2629 JD Delft
Postbus 155
2600 AD Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 22 00

TNO-rapport

TNO 2022 R12607

Literatuurstudie naar dampopen bouwen in relatie tot schimmelvorming en gezondheid

Datum	13 juni 2023
Auteur(s)	Ir. L. Claes Dr. ir. K. Kompatscher
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	46 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	
Projectnaam	Emissieloos Bouwen/ Exploded View
Projectnummer	060.50013

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2022 TNO

Samenvatting

De bouwsector is verantwoordelijk voor ongeveer 40% van de globale CO₂-emissies (IEA, 2019). Daarvan zijn circa 72% operationele emissies en circa 28% materiaalgebonden emissies (Martin Sobota, Isabel Driessen & (CITYFÖRSTER), 2021). De verhouding tussen materiaalgebonden emissies en operationele emissies verandert door het invoeren van onder andere energetische eisen voor gebouwen die de operationele emissies reduceren. Dit in tegenstelling tot de materiaalgebonden emissies; deze stijgen juist door het toenemend materiaalgebruik, zoals grotere isolatiediktes en meer technische installaties. Dit heeft de interesse in biobased en hernieuwbare materialen voor de bouwindustrie hernieuwd. Biobased bouwmaterialen hebben immers een lage materiaalgebonden emissie. Daarnaast is er een trend om het hygroscopische karakter van deze biobased materialen te benutten en dampopen te bouwen. Deze dampopen constructies zouden zo de capaciteit hebben om de relatieve luchtvochtigheid in het binnenklimaat te bufferen en het comfort en de luchtkwaliteit in gebouwen te verbeteren. De combinatie van vochttransport in de wand en biobased materialen roept echter enkele vragen op ten aanzien van het risico op schimmelvorming in de constructie, dit in relatie tot de levensduur van de constructie. Daarnaast dient er meer duidelijkheid te komen over het werkingsmechanisme van dampopen constructies, zoals de interactie met het heersende binnenklimaat en de mogelijkheid tot droging van de wand, en hun bijdrage aan het verbeteren van gezondheid en comfort van bewoners.

De volgende onderzoeksvragen zijn geformuleerd:

1. Hoe groot is het risico op schimmelvorming in een (dampopen) constructie bestaande uit biobased materialen?
2. Wat is de invloed van een dampopen constructie bestaande uit biobased materialen op de gezondheid en het comfort van de gebouwgebruikers?

Onderzoeksaanpak en uitkomsten

Om de onderzoeksvragen te beantwoorden is een scoping review uitgevoerd. Dit resulteerde in 39 geïnccludeerde publicaties voor deze literatuurstudie. Deze zijn onderverdeeld in publicaties die ingaan op het risico op schimmelvorming in een dampopen wandopbouw en publicaties die ingaan op de invloed van dampopen bouwen op de gezondheid en het comfort van gebruikers.

Het merendeel van de beschouwde literatuur concludeert dat er een verhoogd risico op schimmelvorming mogelijk is bij dampopen bouwen door het aanwezige risico op inwendige condensatie. Voor alle studies geldt dat er geen studie beschikbaar is in een praktijksetting waar ook daadwerkelijk in de constructie is bekeken of er schimmelvorming voorkwam. Om dit te benaderen wordt in een aantal studies gebruik gemaakt van temperatuur- en relatieve vochtigheidsmetingen op verschillende diepte in het muurpakket. Dit om af te leiden of er een kans op inwendige condensatie ontstaat en er een gunstig klimaat voor schimmelvorming is. Deze studies vinden veelal plaats onder laboratoriumomstandigheden.

Het grootste aandeel van de beschouwde literatuur maakt gebruik van laboratoriumexperimenten om het risico op schimmelvorming te onderzoeken. Hierbij wordt een wandpakket blootgesteld aan een gesimuleerd binnen- en/of

buitenklimaat van een klimaatkamer en in een enkel geval aan het werkelijk klimaat van het laboratorium of de buitenomgeving. Daarbij wordt de temperatuur en relatieve vochtigheid (RV) op verschillende posities in het pakket gemonitord. Het nadeel van deze methode is de vaak korte duur van de onderzoeken, die meestal slechts enkele weken duren.

Een deel van de studies maakt vervolgens gebruik van simulatiemodellen om de kans op schimmelgroei te voorspellen. Deze methode heeft als voordeel dat er snel een inschatting gemaakt kan worden over een langere tijdsperiode op de kans op inwendige condensatie – en afgeleid daarvan of er een gunstig klimaat is voor schimmelvorming. Deze simulatiemodellen dienen echter wel gevalideerd te zijn. De aannames die worden gedaan zijn niet altijd volledig beschreven in de beschouwde literatuur, waardoor de betrouwbaarheid van de resultaten niet voldoende gecontroleerd kan worden.

In slechts enkele publicaties is een relatie gelegd tussen schimmelvorming en mogelijke impact op materiaaleigenschappen en prestaties van het constructie-element.

In deze literatuurstudie zijn veel onderzoeken gevonden over de relatie tussen hygroscopische isolatiematerialen en binnenklimaatparameters zoals relatieve vochtigheid, CO₂ en andere vluchtige organische stoffen (VOCs). In deze onderzoeken staat vaak de buffering van de dagelijkse fluctuaties centraal. De binnenwandafwerking wordt daarbij niet altijd meegenomen. De relatie tussen dampopen bouwen en het bufferen van bepaalde binnenklimaatparameters wordt over het algemeen onderzocht aan de hand van simulatiemodellen. Uit deze simulaties blijkt dat het bufferend effect afneemt bij toenemende ventilatie. Het is echter onduidelijk of het bufferend effect de nood aan ventilatie vermindert.

Het is niet duidelijk uit de beschouwde literatuur hoe groot het bufferend effect in de praktijk zal zijn. De buffering van RV door hygroscopische materialen is een complex fysisch fenomeen waar meerdere invloedsfactoren van belang zijn. Bijna alle studies zijn gebaseerd op simulaties dit is vaak een ideale representatie van de werkelijkheid. Uit de praktijkstudie (Kurnitski et al., 2007) blijkt dat het effect in een praktijksetting waarschijnlijk lager zal zijn dan de resultaten uit simulaties. Literatuur op het gebied van thermisch comfort legt veelal de relatie tussen gemeten binnenklimaatparameters en de ervaring van gebruikers door het afnemen van vragenlijsten. De relatie tussen gezondheid en comfort en de bufferende werking van RV is niet op een dergelijke wijze onderzocht en die relatie is in de beschouwde literatuur dan ook niet naar voren gekomen.

Conclusies

De volgende antwoorden zijn geformuleerd op de onderzoeksvragen na het bestuderen van de gevonden literatuur.

1. *Hoe groot is het risico op schimmelvorming in een dampopen constructie bestaande uit biobased materialen?*

Het merendeel van de studies concludeert een verhoogd risico op schimmelvorming op basis van metingen aan temperatuur en relatieve vochtigheid in laboratoriumomstandigheden en een risico-analyse op basis van de kans op schimmelgroei bepaald met behulp van simulaties. Er zijn geen praktijksituaties waarin visueel onderzoek wordt gedaan naar het risico op schimmelvorming. Door het gebrek aan praktijkstudies is er op basis van de beschouwde literatuur

onvoldoende inzicht in het risico op schimmelvorming in een dampopen constructie bestaande uit biobased materialen

2. *Wat is de invloed van een dampopen constructie bestaande uit biobased materialen op de gezondheid en comfort van de gebouwgebruikers?*

Op basis van de beschouwde literatuur wordt geen directe relatie gelegd tussen dampopen constructies bestaande uit biobased materialen en gezondheidsindicatoren of comfort van bewoners. De beschouwde literatuur onderzoekt veelvuldig het effect van hygroscopische materialen op de relatieve vochtigheid in een ruimte. Indien de relatieve vochtigheid binnen bepaalde grenzen valt wordt dit als indicator gezien voor een gezond en comfortabel binnenklimaat en gerelateerd aan gezondheid van de gebouwgebruiker. Er kan geen eenduidige conclusie worden getrokken op basis van de beschouwde literatuur.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	6
1.1	Aanleiding en onderzoeksvragen	6
1.2	Leeswijzer	7
2	Onderzoeksaanpak	8
3	Resultaten literatuurstudie	12
3.1	Werkingsprincipe dampopen constructies	12
3.1.1	Verschillende vormen van vochttransport door een wand heen	12
3.1.2	Definitie dampopen bouwen	13
3.1.3	Noodzaak en risico dampscherm	13
3.1.4	Andere vormen van vochttransport	13
3.2	Schimmel en condensatie in dampopen constructies	14
3.2.1	Onderzoeksmethodes	14
3.2.2	Simulaties en laboratoriumexperimenten	15
3.2.3	Dampdrukverschil	23
3.2.4	Dampopenheid van materialen	23
3.2.5	Mogelijkheid tot droging door het regenscherm heen	24
3.2.6	Belang regenscherm en voordelen geventileerde spouw	24
3.2.7	Effect hygroscopische materialen	25
3.2.8	Schimmelvorming in hennepbeton	25
3.2.9	Discussie risico op schimmelvorming in dampopen constructies	26
3.3	Invloed van biobased en dampopen bouwen op de gezondheid en ervaring van gebouwgebruikers	30
4	Discussie	36
4.1	Risico op schimmelvorming	36
4.2	Relatie dampopen bouwen en comfort en gezondheid van gebruikers	37
5	Conclusie	39
5.1	Aanbeveling	39
6	Ondertekening	40
7	Literatuur	41
	Bijlage A Zoektermen en zoekstrings	1

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en onderzoeksvragen

Het verlagen van de emissies van de bouwsector is een belangrijke factor om de klimaatdoelstellingen van Parijs te halen. De bouwsector is namelijk verantwoordelijk voor 40% van de globale CO₂-emissies (IEA, 2019). Daarvan zijn 72% operationele emissies, veroorzaakt tijdens het gebruik van een gebouw door het gebruik van elektriciteit, gas, water en verwarming. De andere 28% zijn materiaalgebonden emissies. Deze zijn gerelateerd aan materialen en (bouw)processen en omvatten alle emissies die worden uitgestoten om tot de fysieke massa van een gebouw te komen (Martin Sobota, Isabel Driessen & (CITYFÖRSTER), 2021).

De verhouding tussen materiaalgebonden emissies en operationele emissies verandert door het invoeren van energetische eisen voor gebouwen. Zo reduceert regelgeving zoals Nearly Zero Energy Buildings (NZEB), de operationele emissies. In tegenstelling tot de materiaalgebonden emissies, deze stijgen door het toenemend materiaalgebruik zoals grotere isolatiediktes en meer technische installaties (Shang & Tariku, 2021). Dit heeft de interesse in nieuwe biobased en hernieuwbare materialen voor de bouwindustrie hernieuwd. Biobased bouwmaterialen hebben immers een lage materiaalgebonden emissie.

Daarnaast is er een trend om het hygroscopische karakter van deze biobased materialen te benutten en dampopen te bouwen (Latif et al., 2014). In plaats van de traditionele dampdichte PE-folie, wordt in een dampopen muurpakket dampopen luchtdichtingsfolie gebruikt, of wordt het dampscherm weggelaten. Door het dampscherm in de wandopbouw weg te laten, kan het hygroscopische isolatiemateriaal waterdamp uit de lucht absorberen en desorberen. Deze dampopen constructies zouden zo de capaciteit hebben om de relatieve vochtigheid in het interieur te bufferen en het comfort en de luchtkwaliteit te verbeteren. Een permeabele gebouwschil kan daarnaast een passief systeem zijn om de luchtkwaliteit in het interieur te controleren. De concentratie van vervuilende stoffen in het interieur zou namelijk verlaagd kunnen worden door diffusie van vervuilende gassen, zoals Volatile Organic Compounds (VOCs) en CO₂, door de gebouwschil heen (Simonson et al., 2005).

Meerdere marktpartijen¹ linken gezondheidsvoordelen aan dampopen bouwen. Ze stellen dat dampopen bouwen, met biobased materialen, een gezondere manier van wonen oplevert dan dampdicht bouwen. Dampdicht bouwen wordt vergeleken met wonen in 'een plastic zak'. Daarmee wordt het dampscherm, een plastic folie, bedoeld. Ze stellen dat dampopen bouwen de gezondheid ten goede komt door een stabielere vochtgehalte in de binnenlucht te realiseren en door een vermindering van kans op schimmelvorming.

¹ [Hoe werkt dampopen bouwen en isoleren - Bouwgezond](#)

[Damp-open bouwen en isoleren - Eco-logisch.nl](#)

[Dampopen bouwen: laat de bouwfysica haar werk doen • Aannemer \(aannemervak.nl\)](#)

[Dampopen houtskeletbouw, wat is dat eigenlijk? \(degroenewoning.nl\)](#)

Het is onduidelijk in welke mate de relatieve vochtigheid in het interieur gebufferd wordt en wat de invloed daarvan op gezondheid van bewoners is. Daarnaast is het ook onduidelijk of het risico op schimmelvorming daadwerkelijk verminderd.

De definitie van dampopen bouwen is onduidelijk in de wetenschappelijke literatuur. Dampopen bouwen wordt door marktpartijen¹ als volgt omschreven: door materialen met lage waterdampdiffusiecoëfficiënt te gebruiken in de wandopbouw, maakt dampopen bouwen vochttransport via diffusie door de wand heen mogelijk. Naar buiten toe dienen de lagen steeds meer dampopen te zijn om transport naar buiten te realiseren. Het is belangrijk geen dampdichte materialen te gebruiken. Vocht dient door het materiaal getransporteerd te kunnen worden zonder dat het materiaal zelf vochtig blijft.

De combinatie van vochttransport in de wand en biobased materialen roept echter enkele vragen op ten aanzien van het risico op schimmelvorming in de constructie, dit in relatie tot de levensduur van de constructie. Daarnaast dient er meer duidelijkheid te komen over het werkingsmechanisme van dampopen constructies, zoals de interactie met het heersende binnenklimaat en de mogelijkheid tot droging van de wand, en hun bijdrage aan het verbeteren van gezondheid en comfort van bewoners.

De volgende onderzoeksvragen zijn geformuleerd:

1. Hoe groot is het risico op schimmelvorming in een (dampopen) constructie bestaande uit biobased materialen?
2. Wat is de invloed van een dampopen constructie bestaande uit biobased materialen op de gezondheid en comfort van de gebouwgebruikers?

Deelvragen die op basis van de onderzoeksvragen zijn geformuleerd betreffen:

- Wat is het werkingsprincipe van een dampopen constructie? Waar, in welke laag, is condensatie of een hogere relatieve vochtigheid (RV) - en bijgevolg schimmelgroei - te verwachten in een dampopen constructie?
- Wanneer is dat te verwachten en wat zijn daarbij de meest invloedrijke factoren?
- Wat is de invloed van condensatie of een verhoogde RV en schimmelgroei op biobased materialen en hun hygrothermische prestaties doorheen de tijd?
- Hoe kan schimmelvorming/groei voorkomen worden in (dampopen) constructies bestaande uit biobased materialen?

1.2 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de onderzoeksaanpak beschreven. Hierin wordt uitgelegd hoe deze literatuurstudie is opgezet. In hoofdstuk 3 worden de resultaten van de literatuurstudie gegeven. Hoofdstuk 4 en 5 geven respectievelijk de discussie en conclusies.

2 Onderzoeksaanpak

Om de onderzoeksvragen te beantwoorden is een scoping review uitgevoerd. Deze methode maakt het mogelijk om veel relevante literatuur te identificeren voor een bepaald onderwerp (Arksey & O'Malley, 2005). De literatuurstudie is uitgevoerd door middel van relevante zoektermen in verschillende databases en door op websites (wetenschappelijke) publicaties te identificeren. De databases van Scopus (technisch gericht) en Pubmed (medisch gericht) zijn doorzocht. De gebruikte zoektermen en zoekstrings zijn terug te vinden in bijlage 0. Tabel 1 geeft een overzicht van de toegepaste zoekstrings per database. De databases zijn, naast Engelstalige zoektermen ook doorzocht met Duitstalige zoektermen. Vanwege de uitgebreide kennis over houtbouw in Duitstalige gebieden. Maar dit leverde geen extra geïnccludeerde literatuur op.

Tabel 1. Overzicht toegepaste zoekstrings

#	Zoekstrings	Scopus (TITLE/ABS)	PubMed (TITLE/ABS)	PubMed (all fields)
1	schimmel - dampopen - constructie -bio-based	114	0	3
2	condensatie - dampopen - constructie -bio-based	530	1	27
3	dampopen - constructie - bio- based - gezondheid	120	0	20
	Subtotaal	764	1	50
	Totaal			815
	Duplicaten			166
	Totaal			649

Verdere uitbreiding van de literatuurset is via de zogenoemde sneeuwbalmethode gedaan, hiervoor is gebruik gemaakt van verkregen literatuur via experts en verwijzingen in publicaties op dit onderwerp. Dit leverde nog 11 extra papers op. Middels criteria voor inclusie en exclusie is een verdere selectie gemaakt in de gevonden titels en samenvattingen. Deze inclusie- en exclusiecriteria zijn terug te vinden in onderstaande tabel.

Tabel 2. In- en exclusiecriteria gehanteerd in dit onderzoek

Inclusiecriteria	Exclusiecriteria
Dampopen gevelopbouw	Papers over verduurzamingsmethodes hout
Effect van hygroscopische materialen op een ruimte of woning	Papers over enkel hygroscopische eigenschappen van hout
Relatie hygroscopische materialen en gezondheid	CLT-wanden
Kalkhennep en HSB-wanden met bio-based isolatie indien volledige muur opbouw geëvalueerd wordt in relatie met gezondheid	Hygroscopische eigenschappen van één materiaal indien enkel onderzocht op materiaal niveau en niet in combinatie met volledige wandopbouw

Kalkhennep en HSB-wanden met bio-based isolatie indien volledige muur opbouw geëvalueerd wordt in relatie met vocht of schimmelvorming in het pakket

Rekenmodel voor hygrisch gedrag bio-based materialen op materiaalniveau

Papers over luchtdichtheid houtconstructies

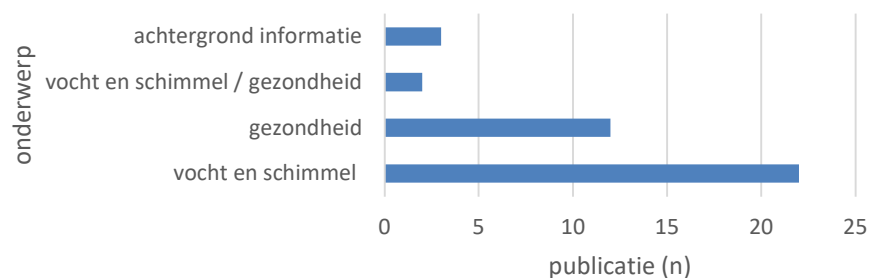
Binnenisolatie voor baksteengevels met erfgoedwaarde

Onderzoek naar specifieke materiaaleigenschappen van nieuwe bio-based materialen

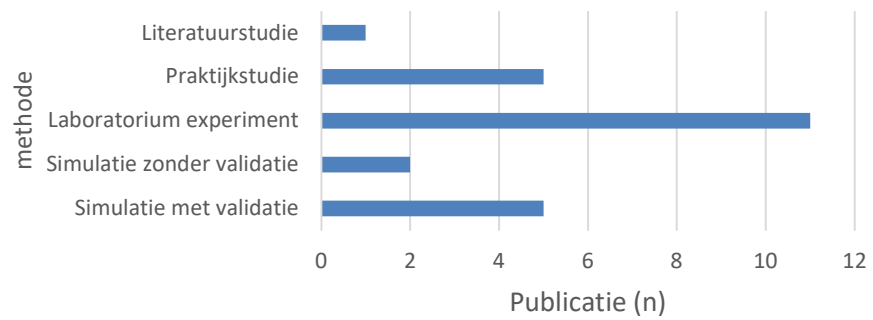
Papers over schade aan het dampscherm

Geïnccludeerde publicaties zijn in het geheel gelezen en beoordeeld op relevantie voor de te beantwoorden onderzoeksvragen. Indien relevant is de literatuur opgenomen in dit rapport.

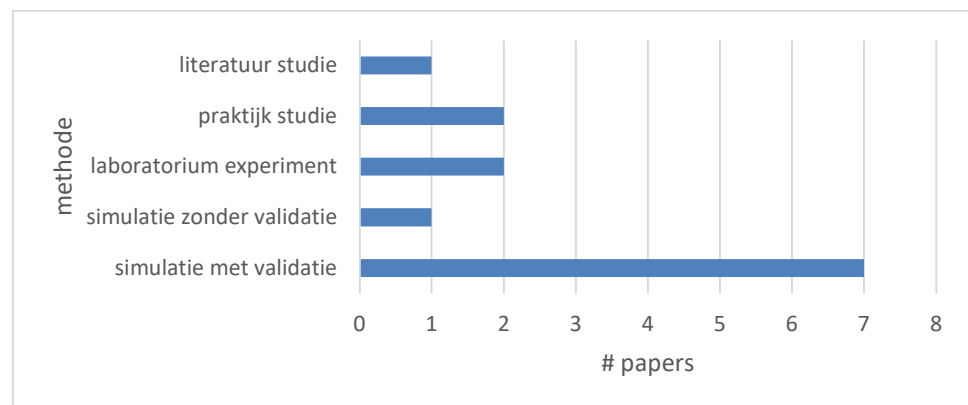
Dit resulteerde in 39 geïnccludeerde publicaties voor deze literatuurstudie. Deze zijn per onderwerp onder te verdelen. Ten eerste, papers die ingaan op het risico op schimmelvorming in een dampopen wandopbouw (n = 22). Ten tweede, papers over de invloed van dampopen bouwen op gezondheid en comfort van gebruikers (n = 12). Ten derde papers die zowel risico op schimmelvorming als het effect op gezondheid behandelen (n=2). Ten slotte enkele papers met achtergrondinformatie. De verdeling van de geïnccludeerde papers per onderwerp is in onderstaande grafiek te zien (Figuur 1). Per onderwerp wordt ook de hoeveelheid literatuurstudies, praktijkstudies, experimenten en simulaties weergegeven (Figuur 2 en Figuur 3).



Figuur 1. Overzicht gevonden onderwerpen en daarbij behorende publicatieaantallen.

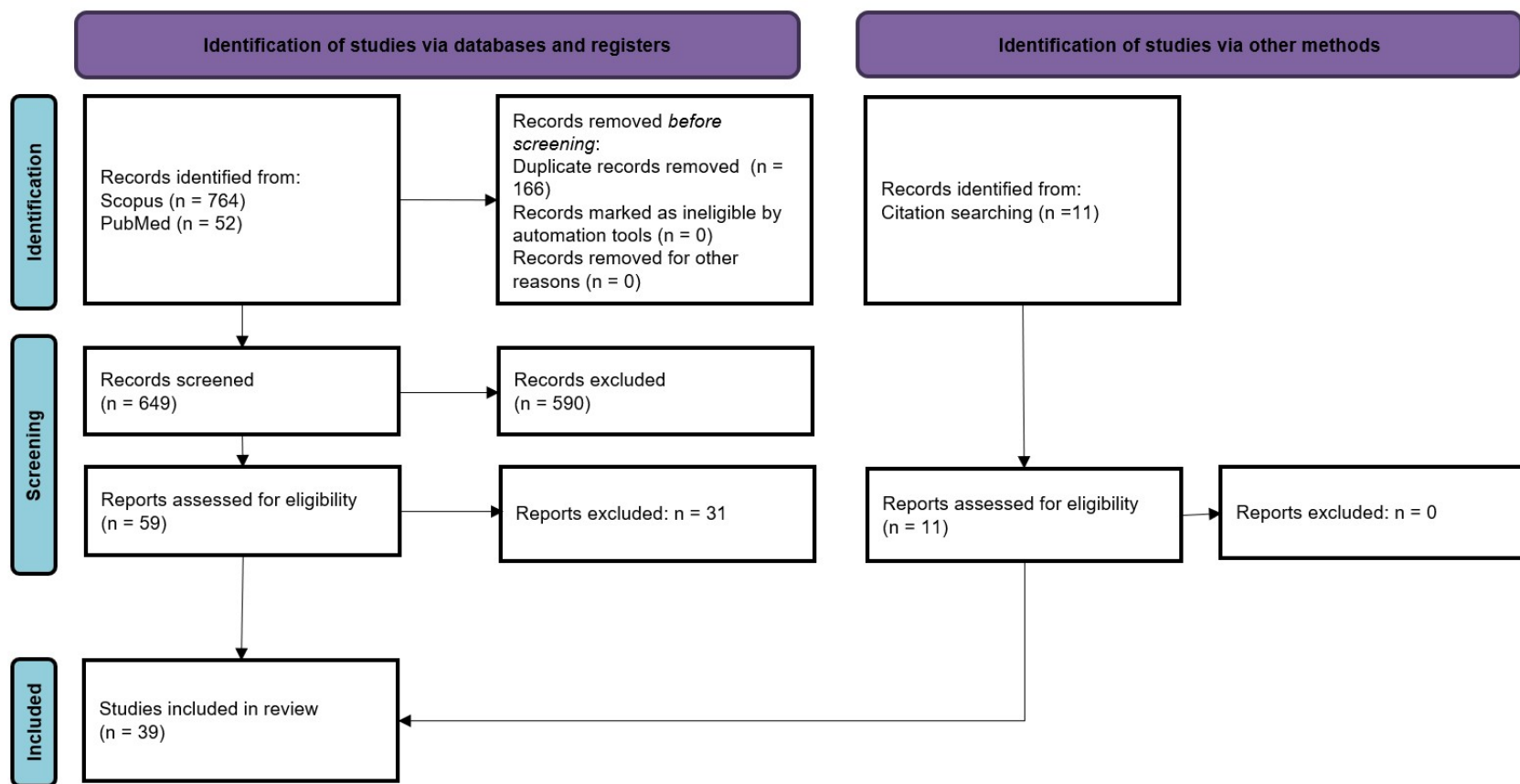


Figuur 2. Overzicht gevonden onderzoeksaanpak en daarbij behorende publicatieaantallen voor publicaties met onderwerp vocht en schimmel in dampopen wandopbouw.



Figuur 3. Overzicht gevonden onderzoeksaanpak en daarbij behorende publicatieaantallen voor publicaties met onderwerp gezondheid en dampopen bouwen.

Figuur 4 laat een PRISMA flowdiagram zien waarin de onderzoeksmethode is samengevat.



Figuur 4. PRISMA flowdiagram met uitgewerkte onderzoeksanpak en beschouwde publicatieaantallen.

3 Resultaten literatuurstudie

Het eerste deel van deze literatuurstudie onderzoekt het risico op schimmelvorming in dampopen constructies bestaande uit biobased materialen. In dit hoofdstuk wordt eerst het werkingsprincipe van dampopen constructies besproken. Nadien wordt de beschouwde literatuur besproken. Ten slotte worden de voornaamste invloedsfactoren op het risico op schimmelvorming verder toegelicht.

3.1 Werkingsprincipe dampopen constructies

3.1.1 *Verschillende vormen van vochttransport door een wand heen*

De beheersing van vocht in een constructie is één van de belangrijkste factoren voor de levensduur van gebouwen. Schattingen geven aan dat water verantwoordelijk is voor ongeveer 75% van de bouwschades (Bastien & Winther-Gaasvig, 2018). Het vochtgehalte van materialen zou ook een significante invloed hebben op hun thermische prestaties (Bastien & Winther-Gaasvig, 2018). In houtskeletbouw (HSB) kan overmatige aanwezigheid van vocht tot schadelijke schimmelgroei op het hout leiden. Dit noemt men houtrot. Hierbij verliest het hout zijn sterkte en kan daardoor de stabiliteit van de constructie in gevaar komen. Daarnaast vermindert overmatig vocht de binnenluchtkwaliteit door de groei van bacteriën en schimmels en verhoogt het een risico op aantasting door insecten (Lamoulie et al., 2012).

Bij de vochtuishouding in gebouwen dient er met verschillende vormen van vochttransport door een wand heen rekening te worden gehouden. De voornaamste zijn vloeistofstroming, capillaire zuiging, luchtstroming (convectie) en diffusie.

De eerste vorm van vochttransport is vloeistofstroming. Het stromen van vloeistoffen wordt veroorzaakt door regen- of grondwater dat de constructie kan binnendringen. De impact van grondwater is te vermijden door het hanteren van correcte bouwdetailering en het hanteren van maatregelen geschikt om risico op grondwaterindringing te verminderen.

De tweede vorm van vochttransport is capillaire zuiging. Slagregen heeft een grote invloed op het hygrothermisch gedrag van een muurpakket. Capillaire zuiging is de absorptie en desorptie van water in poreuze materialen. Dit vindt plaats wanneer de RV groter is dan 95% en er condensatie in de poriën kan plaatsvinden. Ook dit is te vermijden door detailering zoals het toepassen van een regenscherm en waterbestendig maken van elementen onder het maaiveld.

Een derde vorm van vochttransport door wanden heen is convectie. Vochtige lucht infiltreert het pakket en kan condenseren wanneer het in aanraking komt met koude oppervlaktes. Luchtdicht bouwen is van belang voor zowel de energetische efficiëntie van een gebouw, maar ook voor het vermijden van interne condensatie in de constructie (Bastien & Winther-Gaasvig, 2018; Simonson et al., 2005).

De laatste vorm vochttransport is diffusie. Diffusie is het gevolg van een verschil in dampdruk tussen interne en externe condities. De hoeveelheid vocht getransporteerd door dit mechanisme is vaak veel kleiner dan bij de drie hierboven vermelde mechanismen. Daardoor is het verbonden risico ook kleiner (Bastien & Winther-Gaasvig, 2018).

3.1.2 *Definitie dampopen bouwen*

In de laatste jaren is er een trend in de bouwsector om dampopen te bouwen. Dit houdt in dat vochttransport door diffusie door een wand mogelijk gemaakt wordt door het toepassen van materialen met een lage dampdiffusieweerstand. De waterdampdiffusieweerstand is de mate waarin de constructie weerstand biedt aan diffusie als transportmechanisme. Bij deze bouwmethode wordt er wel luchtdicht gebouwd om condensatie door luchtinfiltratie te vermijden en om de energetische prestatie op pijl te houden (Bastien & Winther-Gaasvig, 2018; Simonson et al., 2005). Dampopen bouwen houdt in dat de buitenste materiaallaag meer dampopen is dan aan de binnenzijde.

Er is geen officiële definitie van dampopen bouwen. Vinha & Käkälä definieert een dampopen wandopbouw als muren met luchtdichting, maar zonder dampscherm (J. Vinha & Käkälä, 2004). In de publicatie van Simonson et al. wordt de volgende omschrijving gehanteerd: *‘Bij een dampopen gebouw is er zo veel vochttransport tussen de binnenlucht en de constructie dat dit een significant effect kan hebben op de piekwaarden van de dagelijkse variatie van de relatieve vochtigheid van de binnenlucht’* (Simonson et al., 2005). Dit betekent niet dat deze constructie geen dampscherm of damprem bevat, een hygroscopische binnenwandafwerking zou namelijk ook voor zulke buffering kunnen zorgen.

In dit rapport wordt gekeken naar wanden bestaande uit een volledige biobased wandopbouw. Hierbij komen met name houtskeletbouw (HSB) wanden met biobased isolatiemateriaal zonder dampscherm en hennepbeton wanden zonder dampscherm voor in de beschouwde literatuur.

3.1.3 *Noodzaak en risico dampscherm*

Traditioneel wordt in een HSB-wand een dampscherm toegepast om condensatie achter het regenscherm, ten gevolge van diffusie, te vermijden. Dit benoemen we hier als dampdicht bouwen. (J. Vinha, 2008) vermeldt dat in de laatste 70 jaar wereldwijd veel studies zijn uitgevoerd naar de noodzaak van een dampscherm aan de binnenzijde van wanden. Deze studies concludeerden dat de binnenwandafwerking voldoende dampdicht moet zijn om diffusie van waterdamp van binnen naar buiten te voorkomen. Dit komt voor wanneer een overmaat aan vocht in de binnenlucht, geproduceerd door o.a. bewoners, diffundeert naar de buitenlucht door de wand heen. Bij een ontoereikende waterdampdiffusiecoëfficiënt aan de binnenzijde van de wand kan het vocht gaan condenseren aan de binnenkant van het regenscherm, waardoor er gunstige condities voor schimmeligroei ontstaan. (J. Vinha, 2008)

Het toepassen van een dampscherm kan echter ook schade veroorzaken in situaties met een omgekeerde diffusiestroom van buiten naar binnen, bijvoorbeeld bij een onverwarmd zomerhuis (Bastien & Winther-Gaasvig, 2018; Latif, Ciupala, et al., 2015). Ook in meer zuidelijke klimaten, moet de binnenzijde van een wand juist meer dampopen zijn, aangezien de richting van diffusie vaak van buiten naar binnen plaatsvindt (J. Vinha, 2008), bijvoorbeeld bij het gebruik van een hoog niveau van airconditioning (Thomson & Walker, 2013).

3.1.4 *Andere vormen van vochttransport*

Bij organische isolatiematerialen is er discussie over het bestaan van andere transportmechanismen dan waterdampdruk gedreven diffusie. Het gaat hier om

hoog poreuze materialen. Bijvoorbeeld de impact van temperatuurgradiënten op het vochttransport door bouwmaterialen is een onderwerp waar nog geen consensus over is bereikt (Peuhkuri et al., 2008).

De studie van Peuhkuri et al. heeft het effect van een aantal transportmechanismen in kaart gebracht middels een model. Dit model brengt enkel waterdampdiffusie gebaseerd op isothermische permeabiliteit, en het waterdampdrukverschil in rekening. De studie toont aan dat er een foutmarge bestaat tussen de werkelijkheid en dit model en concludeert dat er daardoor nog andere vormen van vochttransport moeten plaatsvinden. De hypothese dat de RV als drijvende kracht bij niet-isotherm vochttransport in het hygroscopische regime bijdraagt kon niet bevestigd worden (Peuhkuri et al., 2008).

3.2 Schimmel en condensatie in dampopen constructies

3.2.1 Onderzoeksmethodes

Het risico op schimmelvorming is afhankelijk van de RV, temperatuur, de periode van blootstelling, het materiaal en of dit een geschikte voedingsbodem is, en de aanwezigheid van schimmelsporen. Schimmelgroei zal niet versnellen bij een temperatuur lager dan 0°C, maar kan bijvoorbeeld wel versnellen vanaf een relatieve vochtigheid van 80%. Bij welke gunstige condities schimmelvorming plaatsvindt, is sterk afhankelijk van de schimmelsoort.

Om het risico op schimmelvorming te bepalen is in de beschouwde literatuur voornamelijk de methode met isopleten gehanteerd. Hierbij wordt voor een bepaald materiaal de temperatuur en relatieve vochtigheid waarbij schimmelvorming kan voorkomen uitgezet in een grafiek. Deze noemt men een isopleet. Een isopleet geldt voor een bepaalde blootstellingstijd. Als de aangegeven temperatuur en relatieve vochtigheid voor langer dan deze tijd zich voordoen, is er een verhoogd risico op schimmelvorming.

Over het onderwerp vocht en schimmelvorming in dampopen bio-based constructies zijn 22 papers geïncludeerd. Daarvan is er één literatuurstudie over levensduur van stroconstructies (Thomson & Walker, 2013). Er zijn 4 praktijkstudies waarbij over een langere periode de RV en temperatuur in het dampopen muurpakket is gemeten. Er is steeds gemeten op verschillende dieptes in het muurpakket. Takaguchi et al. onderzocht gedurende één jaar de dampopen gevel opbouw van een woning in Tokyo (Takaguchi et al., 2014). De exacte samenstelling van deze HSB-wanden is onduidelijk en niet goed gedocumenteerd. Moujalled et al. heeft gedurende 4 jaar metingen uitgevoerd in een woning in Perigueux, Frankrijk (Moujalled et al., 2018). De woning bestond uit hennepbeton muren met kalkzandpleister buitenwandafwerking en had geen binnenwandafwerking. Simonsen et al. voerde metingen uit in een woning met HSB wandopbouw met houtvezelisolatie in Helsinki, Finland (Simonson et al., 2005). Ten slotte onderzocht Levin & Gudmundsson twee jaar een woning met HSB wanden en cellulose isolatie in Stockholm, Zweden (Levin & Gudmundsson, 1999).

Daarnaast bevat dit literatuuronderzoek tien studies met laboratoriumexperimenten. Hierbij worden (meerdere) muurpakketten blootgesteld aan opgelegde binnen- en buitencondities. Tussen deze studies is er grote variatie in welke condities gesimuleerd worden met een klimaatkamer. Zo wordt ofwel het binnenklimaat gesimuleerd, ofwel het buitenklimaat ofwel beide. Indien slechts één klimaat

gesimuleerd wordt, is het pakket langs één zijde blootgesteld aan werkelijke omstandigheden. Dit is ofwel het werkelijke buitenklimaat of het binnenklimaat van het laboratorium. Ook de duur van deze experimenten varieert sterk tussen de studies.

Ten slotte bespreekt dit literatuuronderzoek acht simulatiestudies. Twee van deze modellen zijn niet gevalideerd. Er zijn meerdere simulatiestudies uitgevoerd met de software WUFI, deze software is al gevalideerd in andere studies (Bastien & Winther-Gaasvig, 2018; Dhakal et al., 2017; Lamoulie et al., 2012).

3.2.2 *Simulaties en laboratoriumexperimenten*

In twee simulatiestudies van Latif et al. is het risico op schimmelvorming in dampopen HSB wanden onderzocht (Latif et al., 2014; Latif, Ciupala, et al., 2015). Hierbij zijn verschillende HSB-wandpanelen aangebracht in de oostgevel (zonder bezonning) van een testgebouw. De wandopbouw bestond uit, van buiten naar binnen, 10 mm houten regenscherm, 25 mm spouw, 0,5 mm ademend membraan, 11 mm OSB, 100 mm isolatie tussen houten stijlen. De binnenwandafwerking en het isolatietype varieerde per test. De panelen zijn blootgesteld aan het buitenklimaat van Wales (VK) en in het interieur van het testgebouw zijn een variatie aan luchtvochtigheden bij constante temperatuur gesimuleerd. Aan de hand van sensoren is de temperatuur en relatieve vochtigheid in verschillende plaatsen in het pakket gemeten. Namelijk op het binnenwandoppervlak, in het midden van de isolatielaag en tussen de isolatielaag en de OSB-plaat langs het exterieur. Met deze sensormetingen en Sedlbauer's isopleten voor biobased materialen werd het risico op schimmelvorming ingeschat. In de andere studie van Latif et al. (2015) is hennephoutisolatie (scheven) (30% hennep en 60% houtvezels 10% polyester) onderzocht (Latif, Ciupala, et al., 2015). De wandopbouw is getest met OSB- of gipsplaat binnenwandafwerking en met of zonder dampscherm. De panelen zijn 14 dagen blootgesteld aan het buitenklimaat van Wales (VK) tijdens de maanden januari en februari. De RV van het binnenklimaat is gedurende 2 dagen van de test opgedreven tot $90 \pm 5\%$. Dit vochtgehalte kan voorkomen in en rond badkamers of keukens. Daarna is de RV op $55 \pm 5\%$ gehouden voor 4 dagen, wat een vaak voorkomende situatie is in Britse huishoudens. Tenslotte is de RV teruggebracht naar 40% tijdens een periode van 8 tot 10 dagen. De binnentemperatuur werd gedurende de volledige test op $25 \pm 3^\circ\text{C}$ gehouden.

Zowel voor het pakket zonder als met dampscherm is er risico op schimmelvorming tussen de isolatie en het regenscherm, al is dit risico groter bij dampopen constructies. In het paneel zonder dampscherm liggen de hygrothermische condities gedurende het hele experiment boven de 4 dagen isopleet. Met een gipsplaat binnenwandafwerking zelfs boven de 1 dag isopleet. Bij de dampdichte muurpanelen liggen de hygrothermische condities gedurende het hele experiment boven de 8 dagen isopleet. Bij een dampopen muurpakket zijn de condities na 4 dagen dus gunstig voor schimmelgroei. Bij dampdichte muurpakketten zijn de condities na 8 dagen gunstig voor schimmelgroei.

In Latif et al. (2014) werd de dampopen wandopbouw één maal met steenwolisolatie en één maal met hennepisolatie onderzocht (Latif et al., 2014). Beide pakketten hadden geen dampscherm. De muurpanelen zijn 39 dagen blootgesteld aan een binnenklimaat met variërende RV tussen 55 en 90% bij $25 \pm 4^\circ\text{C}$, tijdens de maanden juli en augustus 2012. De RV tussen het regenscherm (de

OSB-plaat) en de isolatie steeg geregeld tot 100% in de wandpanelen, wat duidt op inwendige condensatie. De kans op en frequentie van de condensatie is lager bij het paneel met hennepisolatie dan bij het paneel met steenwolisolatie. Voor beide pakketten is er op basis van Sedlbauer's isopleten risico op schimmelvorming, maar dit risico is minder groot bij het paneel met hennepisolatie.

Bij beide testen werd er na ontmanteling van de panelen geen zichtbare schimmelvorming aangetroffen. Dit is waarschijnlijk te wijten aan de korte duur van de testen.

Rode berekende met een 1D warmte- en vochttransport simulatie de RV tussen het regenscherm en de isolatie van een HSB wand in een westgevel in een Deens klimaat (Rode, 1998). Verschillende samenstellingen zijn doorgerekend, namelijk met gipsplaat of houtvezelplaat als regenscherm, cellulose- of glaswolisolatie en verschillende binnenwandafwerkingen: geen binnenwandafwerking, enkel onafgewerkte gipsplaat, dampremmende folie en dampscherm. Er is gerekend met een dagelijks gemiddelde vochttoename van 3,5 g/m³ van november tot maart, 3,0 g/m² in april en oktober, 2,5 g/m³ in mei en september en 2,0 g/m³ in juni, juli en augustus.

De studie concludeert dat er bij alle samenstellingen zonder dampscherm risico op schimmelvorming en inwendige condensatie is. De enige dampopen samenstelling waarbij geen condensatie optreedt is een muursamenstelling met cellulose-isolatie en een gipsplaat als regenscherm. Gipsplaat heeft immers een lage dampdiffusieweerstand. Maar ook in deze samenstelling met cellulose-isolatie en gipsplaat als regenscherm blijft de RV voor meerdere maanden hoger dan 90%. Er is dus ook hier risico op schimmelvorming. Het risico op schimmelvorming kan enkel vermeden worden met een dampdicht dampscherm. Een limitatie in deze studie is dat de gebruikte methode geen rekening houdt met het hygroscopisch effect van materialen.

Tijdens de studie van Piot et al. zijn twee hennepbeton wanden gedurende 1 jaar blootgesteld aan het buitenklimaat en een met de klimaatkamer gesimuleerd binnenklimaat (Piot et al., 2017). Deze testen vonden plaats in Le Bourget du Lac, Frankrijk. De wandopbouw bestond uit geprefabriceerde, droog gestapelde, hennepbetonblokken rond houten stijlen met een pleisterlaag langs het interieur en exterieur. De pleisterlaag langs het exterieur is op één wand dampopen maar water absorberend, op de andere wand dampopen en niet-water absorberend.

Gedurende twee maanden van het jaar is de vochtproductie in het interieur gesimuleerd, namelijk overdag 90% RV, in de nacht 40%, steeds 25°C, tijdens de andere periodes kon de RV in het binnenklimaat vrij evolueren.

Met sensoren is de RV, temperatuur en warmteflux in de wandopbouw gemeten, namelijk tussen de verschillende lagen en in het midden van de isolatielaag.

Na afloop van het experiment zijn stalen uit verschillende dieptes van het hennepbeton onderzocht in een laboratorium. Na een incubatieperiode is de microbiële groei per gram van de stalen bepaald. Het risico op schimmel is verwaarloosbaar in het midden van de muur, onder de coating aan het interieur en onder de niet water absorberend exterieur coating na 1 jaar blootstelling. Indien een water absorberende coating aan het exterieur wordt toegepast, is er wel risico op schimmelvorming. De testmuren zijn zuidgeoriënteerd opgesteld als gevolg van de beschikbare infrastructuur, waardoor er mogelijk meer droging kan plaatsvinden door radiatie dan bij noord georiënteerde muren. Ook is er slechts gedurende een korte periode vocht geproduceerd in het interieur.

Rahim et al. onderzochten een hennepbeton muur zonder binnen- of buitenwandafwerking op de hygrothermische reactie bij blootstelling aan temperatuur en RV variaties (Rahim et al., 2017). De wand werd tegen een klimaatkamer geplaatst, waar het buitenklimaat gesimuleerd is. De andere zijde werd blootgesteld aan het binnenklimaat van het laboratorium (21°C en 60% RV). Om de wintersituatie te simuleren is de muur blootgesteld aan een sinuscyclus van temperatuur en RV over 24 uur tussen 5°C met 80% RV en 15°C met 50% RV. Het vochtgehalte in de lucht blijft hierbij relatief constant.

In het hennepbeton blijft de RV relatief constant tijdens de test, alhoewel de temperatuur stijgt. Dit betekent dat het absolute vochtgehalte in het materiaal stijgt. Er wordt verondersteld dat er weinig kans op schimmelvorming is omdat de RV in het materiaal relatief constant blijft en onder de verzadigingsgrens blijft.

Vinha onderzocht de hygrothermische prestaties van HSB wanden voor het Fins klimaat (J. Vinha, 2008). Hierbij is de noodzaak van een dampscherm of dampremmende laag onderzocht. In dit onderzoek zijn laboratoriumtesten, praktijkmetingen en numerieke simulaties uitgevoerd. Twee publicaties, die onderdeel zijn van dit onderzoek zijn in het huidige rapport geïncludeerd, namelijk (J. Vinha & Käkälä, 2004; J. O. Vinha et al., 2001).

Een testopstelling is ontwikkeld die het mogelijk maakt om het hygrothermisch gedrag van de muur te onderzoeken bij gecontroleerde binnen- en buitencondities. Deze testopstelling bestaat uit twee kamers, waar de muursamenstelling tussen geplaatst kan worden. De muursamenstellingen werden onderzocht onder gemiddelde Finse herfst-, winter- en lentecondities en een binnenklimaat van 20°C en vochtproductie van 4 g/m³ in de herfst en 6 g/m³ in de winter. Dit betekent dat de binnenlucht 4 of 6 g/m³ extra vocht bevat dan de buitenlucht.

De buitenwandafwerking, zoals metselwerk of houten gevelbekleding, zijn in deze testen verwaarloosd. Metingen in testwoningen tonen immers aan dat de temperatuur en RV in de geventileerde spouw vergelijkbaar is aan de temperatuur en RV van de buitenlucht. Dit is onafhankelijk van de gebruikte gevelbekleding en de buitentemperatuur. Aangezien de gevelbekleding het pakket voldoende afschermt van slagregen, is het ook niet nodig om de slagregen mee te nemen in de testopstellingen.

Tijdens de studie van Vinha & Käkälä (2004) zijn 57 verschillende HSB wandsamenstellingen getest aan de hand van de hierboven beschreven testopstelling (J. Vinha & Käkälä, 2004). De onderzochte muursamenstellingen hadden verschillende mate van dampdichting. Voor dampopen pakketten werd bitumen papier als luchtdichting aan de binnenzijde van het pakket toegepast. Als regenscherm werden houtvezelplaat, steenwolplaat, waterdicht maar dampopen membraan, gipsplaat en multiplex en 0,2 mm plastic getest. Als isolatiemateriaal werden glaswol, steenwol, verschillende types cellulose, flax en zaagsel getest. De verschillende wandsamenstellingen zijn geëvalueerd op voldoende droging van het bouwvocht, condensatie achter het regenscherm in de winter en de droogcapaciteit ervan in de lente, voor het klimaat in Tampere, Finland. In de eerste fase zijn de pakketten getest zonder overtollige vochtproductie in het interieur. Tijdens de simulatie van de wintercondities is de RV achter het regenscherm hoger bij dampopen dan bij niet dampopen constructies. Maar in geen enkele samenstelling vond er condensatie plaats.

Wanneer er vochtproductie in het interieur wordt gesimuleerd, 4g/m^3 in de herfst en 6g/m^3 in de winter, stijgt in alle dampopen samenstellingen de RV achter het regenscherm. In de herfst is deze stijging zo'n 5% en in de winter vindt er condensatie plaats. In tegenstelling tot meer dampdichte samenstellingen (plastic gecoat papier i.p.v. bitumen papier) is de RV achter het regenscherm in de herfst zo'n 10% lager dan dampopen constructies en vindt er geen condensatie plaats in de winter.

Het risico op schimmel werd berekend aan de hand van het onderzoek van Viitanen (1996). Tijdens de herfstperiode is er voor dampopen muren een klein risico op schimmelvorming. De RV achter het regenscherm overschrijdt namelijk licht de schimmelgroei limiet.

In Vinha et al. (2001) zijn verschillende pakketten met cellulose-isolatie of minerale wol in combinatie met verschillende damp-/luchtdichte folies en verschillende type regenschermen onderzocht (J. O. Vinha et al., 2001). De studie concludeert dat er bij dampopen constructies duidelijk een hoger risico op condensatie en schimmelvorming is dan bij constructies met een dampscherm. Bij een lagere waterdampdiffusiecoëfficiënt van het binnenwandoppervlak neemt de RV achter het regenscherm toe. Er wordt aanbevolen dat bij een verhoogd vochtgehalte in het interieur kleiner dan $4,0\text{g/m}^3$, de waterdampdiffusiecoëfficiënt van het binnenoppervlak ten minste 5 keer groter moet zijn dan de waterdampdiffusiecoëfficiënt van het buitenoppervlak.

Op basis van de hierboven beschreven laboratoriumexperimenten en metingen in testwoningen is een numeriek simulatiemodel gevalideerd. Deze berekening houdt rekening met diffusie, capillaire stroming en oppervlaktediffusie (J. Vinha, 2008). Dit model toont aan dat de verhouding waterdampdiffusiecoëfficiënt van de binnenwandafwerking en het regenscherm invloed heeft op de RV aan het binnenwandoppervlak van het regenscherm.

De minimale ratio van de dampdiffusiecoëfficiënt van de binnenwandafwerking ten opzichte van het regenscherm varieert sterk en is afhankelijk van de materiaalkeuze voor het regenscherm en de thermische isolatie. De binnenwandafwerking kan meer dampopen zijn naarmate het regenscherm meer dampopen en thermisch isolerend is. De verschillen tussen hygroscopische en niet hygroscopische isolatiematerialen zijn echter klein.

De aanbeveling dat de waterdampdiffusiecoëfficiënt van het binnenwandoppervlak ten minste 5 keer groter moet zijn dan de waterdampdiffusiecoëfficiënt van het buitenoppervlak, voldoet echter voor veel muursamenstellingen niet om risico op schimmelvorming te vermijden.

Rose & McCaa stelden gedurende 3 jaar verschillende HSB wanden bloot aan het binnenklimaat van het laboratorium en aan de buitencondities van Champaign, Illinois (Rose & McCaa, 1998). Het binnenklimaat had een constante temperatuur van 21°C met 50-55% RV gedurende het eerste jaar en een RV van 40%, gedurende de laatste 2 jaar. Verschillende pakketten, namelijk diverse types glasvezel of cellulose-isolatie en met of zonder dampscherm, zijn onderzocht. De onderzochte HSB-wanden bestonden, van exterieur naar interieur, uit verticale houten gevelafwerking, geventileerde spouw, OSB-regenscherm, isolatie, al dan niet een dampdichting en een gipsplaat met twee lagen latex verf. De RV en temperatuur in het pakket en tussen de lagen is gemonitord met (experimentele) sensoren. De RV in het pakket is beduidend hoger in de pakketten zonder

dampscherm. Na afloop van de test zijn de pakketten ontmanteld en visueel onderzocht op schimmelvorming. Bij muren met dampscherm werd enkel schimmel vastgesteld rond de luchtlekken, veroorzaakt door de plaatsing van sensoren door de luchtdichting. In tegenstelling tot de muren zonder dampscherm, waar een uniform verspreide schimmelgroei op het regenscherm werd vastgesteld.

Een simulatie met WUFI voor een HSB-wand met een pleisterlaag als buitenwandafwerking en houtvezelisolatie in Lund, Zweden werd uitgevoerd door Bastien & Winther-Gaasvig (2018). De wand is gesimuleerd zowel met cementpleister en kalkpleister als buitenwandafwerking en met en zonder dampscherm. Bij deze simulaties is de binnentemperatuur constant gehouden op 20°C. Vochtproductie werd meegerekend voor een gezin van 4 personen, wat overeenkomt met 4610 g/dag tijdens weekdays en 8384 g/dag tijdens het weekend. Met deze input en 0,5 ACH mechanische ventilatie resulteert de simulatie in een RV in het interieur tussen 30% en 45% in de winter en 35% en 55% in de zomer.

Uit de simulatie bleek dat het toevoegen van een dampscherm aan de wandsamenstelling weinig invloed heeft op de vochtinhoud van de buitenste houtvezelplaat. Bij het gebruik van een niet-water opnemende buitenpleister van cement was de vochtinhoud van het regenscherm gelijk bij samenstellingen met en zonder dampscherm. Bij het gebruik van een water-absorberende kalkpleister als buitenwandafwerking is de vochtinhoud van het regenscherm slechts 5% lager bij het incorporeren van een dampscherm in de samenstelling (Bastien & Winther-Gaasvig, 2018).

Lee et al. simuleerde het hygrothermisch gedrag van HSB wanden met verschillende samenstellingen voor 6 klimaatzones van Japan (Lee et al., 2020). De wandopbouw werd gesimuleerd met cellulose of glaswolisolatie en met of zonder geventileerde spouw. De simulatie is gevalideerd aan de hand van metingen in een demonstratiewoning. Deze simulatie geeft aan dat bij een dampopen muurconstructie met cellulose-isolatie, condensatie vermeden kan worden in alle 6 de klimaten, wanneer enkel een houtvezelplaat gebruikt wordt als regenscherm. De RV in de isolatie is lager bij het toepassen van een geventileerde spouw. In deze simulatie is het effect van temperatuur op de water-absorptie capaciteit van de isolatie niet meegerekend.

Lamoulie et al. simuleerde in WUFI, zonder extra validatie, het hygrothermisch gedrag van 157 pakketten (Lamoulie et al., 2012), met als doel een pakket met maximale dampdoorlatendheid en minimaal risico op schimmelvorming te bepalen. Verschillende materiaalparameters zijn gesimuleerd, namelijk de dampdoorlaadbaarheid van het regenscherm (S_d 0,10 m en 0,18 m), het type isolatie (glaswol, houtvezel, cellulose), de dampdoorlaadbaarheid van het dampscherm (S_d 18 m, 10 m, 5 m, 0 m), en de dampdoorlaadbaarheid van het paneel dat voor de dwarse stijfheid van de wand zorgt (S_d of 0,5 m, 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 50 m). Daarnaast worden ook varianten met extra binnen- en/of buitenisolatie onderzocht. De simulatie is uitgevoerd voor 4 klimaten, een ongunstig laaglandklimaat (Nancy), een kustzoneklimaat (Brest), een bergklimaat (La Pesse), een mediterraan klimaat (Nice). De dampdruk in het interieur wordt aangenomen 5 g/m² hoger te zijn dan de dampdruk van het exterieur, zoals in de Franse standaard gebruikelijk is voor woningen. Hieruit wordt geconcludeerd dat extra isolatie aan de binnenzijde van het damp-/luchtscherm vaak tot condensatie leidt.

Muursamenstellingen die condensatie kunnen limiteren hebben het paneel dat voor de stijfheid van de wand zorgt aan de binnenzijde, en extra isolatie aan de buitenzijde van het regenscherm. De waterdampdiffusiecoëfficiënt van het dampscherm moet voldoende hoog zijn. De ratio van waterdampdiffusiecoëfficiënt de binnenafwerking t.o.v. waterdampdiffusiecoëfficiënt van de buitenafwerking moet minimaal 5 zijn.

Thue et al. stelde 18 verschillende wandsamenstellingen van HSB bloot aan een binnen- en buitenklimaat, gesimuleerd door 2 klimaatkamers (Thue et al., 1996). Het binnenklimaat is constant gehouden bij $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ met RV tussen 50 en 55%. In de andere klimaatkamer is een winterklimaat gesimuleerd met -10 tot -16°C met een RV tussen 60% en 80% voor een periode van 69 dagen. Daarna zijn er om de 3 weken 4 tot 7 'warme dagen' gesimuleerd waarbij de koeling in de klimaatkamer werd uitgeschakeld. De volledige testperiode duurde 1 jaar.

Resultaten geven aan dat constructies met een lage ratio tussen waterdampdiffusiecoëfficiënt aan de warme en koude kant van de constructie meer kans hebben op condensatie. In alle testen met lage waterdampdiffusiecoëfficiënt aan de binnenzijde zijn tijdens de test condities voor schimmelvorming en houtrot aanwezig, namelijk een vochtgehalte van het hout boven 20% wanneer de temperatuur hoger is dan 0°C . Of deze wandsamenstellingen risico lopen op schade door vocht is afhankelijk van de droogcapaciteit in de zomer. De droogcapaciteit is afhankelijk van de waterdampdiffusiecoëfficiënt van de luchtdichting aan de buitenkant van de muur en het zomerklimaat. Dit is niet af te leiden uit dit onderzoek aangezien enkel de wintercondities gesimuleerd werden.

Dhakal et al. (2017) onderzocht aan de hand van simulaties in WUFI de geschiktheid van dampopen wanden met hennepbeton isolatie voor het klimaat in Ontario, Canada. Zowel een hennepbeton wand met kalkpleister als buitenwandafwerking als een hennepbetonwand met geventileerde spouw en houten gevelbekleding werd onderzocht. De simulatie werd uitgevoerd voor het klimaat van Toronto, voor een periode van 3 jaar. De waterinhoud bleef onder 15% in elke laag en geen vochttopstapeling voor langere termijn werd vastgesteld. De muuropbouw met geventileerde spouw absorbeert minder water en droogt sneller dan de opbouw met buitenpleister.

Voor beide opbouwen werd er geen risico op condensatie, vorstschade of schimmelgroei vastgesteld. De binnentemperatuur en RV gebruikt in de simulatie is user-defined voor een typisch interieur van residentiële gebouwen maar dit wordt in de publicatie niet nader gedefinieerd. De hoeveelheid vochtproductie in het interieur waarmee rekening is gehouden is dus onduidelijk (Dhakal et al., 2017).

Gołębiewski & Pietruszka onderzochten twee muurpakketten op condensatievorming aan de hand van een Glaserberekening (Gołębiewski & Pietruszka, 2021). Het eerste muurpakket bestaat uit hennepbeton met binnen- en buitenwandpleister, het tweede uit hennepbeton met binnenwandpleister en isolatie van minerale wol, regenscherm, geventileerde spouw en houten gevelbekleding. De berekening werd uitgevoerd voor 6 locaties in Polen, elk met een andere klimaatzone. Voor de binnenklimaatcondities is 20°C aangenomen, en een binnendampdruk volgens de derde classificatie van de EN ISO 13788:2012 norm. Het houten frame in de muur werd verwaarloosd. Deze methode houdt geen rekening met het hygroscopisch gedrag van materialen, sorptie, veranderende materiaaleigenschappen in functie tot vochtinhoud, vloeistoftransport, latente

warmte en luchtbewegingen in en tussen de materialen. De methode neemt constante randvoorwaarden en vochttransport in één richting aan. Volgens de berekening is er geen condensatie in de muursamenstelling met buitenwandpleister, of verdampt deze condensatie weer na het stookseizoen. Er vindt ook geen condensatie plaats in de muursamenstelling met spouw en houten gevelbekleding. Deze paper concludeert dat deze muursamenstellingen bruikbaar zijn in het Poolse klimaat als er, locatie specifiek, gedetailleerder onderzoek wordt uitgevoerd.

Hagentoft & Harderup berekenden een HSB wand met baksteengevel en cellulose inblaas isolatie voor Lulea, Zweden (Hagentoft & Harderup, 1996). De wandopbouw is zowel met als zonder dampscherm doorgerekend aan de hand van 1D-HAM. Deze berekening houdt rekening met dampdiffusie en convectie, maar niet met vloeistofstromingen. Er is gebruik gemaakt van een vereenvoudigde sorptie isotherm. Met de vochtproductie is gevarieerd, om de maximaal acceptabele waarde voor verschillende wandopbouwen te bepalen.

In de wand zonder dampscherm met een vochtproductie van $0,0035 \text{ kg/m}^3$ in het interieur, is de RV achter de waterkerende laag gedurende het hele jaar hoger dan 90%. Dit zal waarschijnlijk schimmeligroei in het constructiehout veroorzaken. Voor een muurpakket zonder dampscherm en gevelsteen met lage dampdoorlatendheid kan een toename van de vochtproductie van $0,0025$ tot $0,003 \text{ kg/m}^3$ na enkele jaren leiden tot onacceptabele vochtcondities in de wand. Vanaf een toename van $0,001 \text{ kg/m}^3$ van de vochtproductie is er dus risico op schimmelvorming. Dit komt overeen met 30% minder ventilatie of verandering in het gebruikersgedrag of -aantal. Ook bij een onvoldoende dampopen gevelafwerking is er vochttopstapeling. De berekeningen geven aan dat de vochtcondities in de muur sterk afhankelijk zijn van materiaalkeuze, aanwezigheid van een dampscherm, en de vochtproductie in het interieur.

3.2.2.1 *Praktijkonderzoek*

Om het hygrothermisch gedrag van hennepbeton te onderzoeken zijn gedurende 4 jaar in-situ metingen uitgevoerd in een woning in Perigueux in Zuidwest Frankrijk (Moujalled et al., 2018). De metingen zijn gedaan in de noord- en westgevel van de kantoorruimte van de woning. De wandopbouw bestaat uit hennepbeton met kalkzand pleister als buitenwandafwerking maar zonder binnenwandafwerking. Een textiele binnenwandafwerking is enkele maanden na de start van de metingen toegevoegd als esthetische afwerking. Zowel RV als temperatuur is gemeten op het binnen- en buitenoppervlak en op 15 cm en 25 cm diepte van het 30 cm dikke hennepbeton.

Op de diepte van 25 cm, neemt de vochtigheid licht af gedurende februari tot juli en neemt dan weer toe van juli tot januari. De studie concludeert dat de RV in de muur aan de hoge kant is en dit verder onderzocht dient te worden met betrekking tot het risico op schimmeligroei (Moujalled et al., 2018).

Goodhew et al. (2004) onderzocht gedurende 2 jaar de vochtinhoud van strowanden in de praktijk. Het gebouw is tijdens de onderzoeksperiode gebruikt als opslagruimte, er was dus geen vochtproductie en het werd niet verwarmd. De wandopbouw bestaat uit een houten frame met stro en kalkpleister als binnen- en buitenwandafwerking. Op 7 van de 8 locaties waar het vochtgehalte gemeten is, bleef het vochtgehalte van het stro onder de 20%, dit is het vochtgehalte dat geassocieerd wordt met de start van degradatie en schimmelvorming van stro. Op

één plek steeg het vochtgehalte echter tot boven 25% gedurende meerdere maanden, bij visueel onderzoek is er ook degradatie van het stro teruggevonden. Het vochtgehalte in het natste deel van de muren, de buitenzijde, is gecorreleerd met de gemeten regen op deze locatie van het gebouw. Het verhoogde vochtgehalte zou dus te wijten kunnen zijn aan de vocht-absorberende buitencoating in plaats van vochttransport door diffusie (Goodhew et al., 2004).

Simonson et al. (2005) voerde metingen uit in een bewoonde testwoning met dampopen HSB-wanden met houtvezelisolatie. Het huis heeft geen plastic dampscherm en de ratio tussen waterdampdiffusiecoëfficiënt van binnen en buiten is 3 of 4:1. De gemiddelde binnentemperatuur in de woning was $21,4 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ in de winter en $23,5 \pm 1,1^{\circ}\text{C}$ in de zomer. De gemiddelde RV in de winter was $21 \pm 3\%$ in de winter en $30 \pm 7\%$ in de zomer. De RV tijdens de winter is redelijk laag maar niet ongewoon voor woningen in koude klimaten. Tijdens de winter was het dampdruk verschil tussen interieur en exterieur gemiddeld $1,9 \text{ g/m}^3$ in de slaapkamer en $0,7 \text{ g/m}^3$ in de hal. Het dampdrukverschil was even groot in de zomer als in de winter. Deze waarden zijn in vergelijking met andere onderzoeken relatief laag. Aan de hand van sensoren is het vochtgehalte aan de binnen- en buitenzijde van de isolatie gemeten. Het vochtgehalte aan het exterieur was steeds hoger dan die van het interieur. Bij het evalueren van het risico op schimmelgroei werd hout als referentiemateriaal gebruikt omdat dit typisch het meest schimmelgevoelige materiaal in de gevelopbouw is. Het risico op schimmel werd geëvalueerd op basis van de studies van Viitanen (Viitanen, 1996; Hukka and Viitanen, 1999). Het vochtgehalte van de stijlen was hoog genoeg om risico op schimmelvorming te veroorzaken, maar tijdens deze periode bleef de temperatuur in de zone met het verhoogd vochtgehalte onder 5°C , daarom is kans op schimmelvorming klein gebleken in deze specifieke situatie (Simonson et al., 2005).

In dezelfde studie simuleerde Simonson met een numeriek model een HSB-wand in een Fins klimaat. Als randvoorwaarden werd de luchtvochtigheid van 2 g/m^3 boven de buitenluchtvochtigheid en minimaal een RV van 35% binnen aangehouden. Deze simulaties tonen aan dat het drogen van de muur voornamelijk afhangt van de ratio tussen de binnen- en buitenwaterdampdiffusiecoëfficiënt (verhouding minimaal 3:1) en licht afhangt van de permeabiliteit en absorptiecapaciteit van de isolatie. In deze simulatie kan het toepassen van cellulose-isolatie in plaats van minerale wol de periode met condities geschikt voor schimmelvorming 2-5 weken verkorten.

Tijdens de studie van Levin & Gudmundsson zijn gedurende 2 jaar metingen uitgevoerd in drie dampopen woningen in Stockholm (Levin & Gudmundsson, 1999). Aan de hand van sensoren werd de temperatuur en de RV in het buitenste deel van de isolatie in de noord georiënteerde muur en in het binnenklimaat gemeten. De gemiddelde vochtproductie over de periode van 2 jaar verschilt per woning, $1,1 \text{ g/m}^3$, $0,8 \text{ g/m}^3$ en $1,5 \text{ g/m}^3$ en reflecteert het aantal bewoners maar is ook afhankelijk van gebruikers gewoontes en de ventilatie. Bij deze lage mate van vochtproductie is geen condensatie of hoge RV in de muursamenstellingen gemeten.

Een 1-dimensioneel diffusiemodel is gevalideerd op basis van deze bovengenoemde metingen. Hiermee werd het hygrothermisch gedrag van de muren gesimuleerd voor hogere vochtgehaltes van de binnenlucht namelijk 2 en 4 g/m^3 gedurende het hele jaar. Dit resulteert in condensatie aan het

binnenoppervlak van het regenscherm en hoge RV in de isolatie. Vooral bij hoge vochtproductie van 4 g/m^3 is schade aan de constructie waarschijnlijk.

Thomson & Walker voerden 2 jaar praktijkmetingen uit in een niet verwarmde testhut in het zuidwesten van Engeland (Thomson & Walker, 2013). De temperatuur en RV in de wand is gemeten in de zuidwest georiënteerde wand omdat dit de dominante windrichting is. Het muurpakket bestaat uit een strowand met kalkpleister als binnen- en buitenwandafwerking. Volgens de isopleet methode, gedefinieerd door het Fraunhofer instituut, treden er condities op waarbij schimmelvorming mogelijk is. Bij visuele inspectie, door een deel van de buitenplaten te verwijderen, werd er geen actuele schimmelgroei of degradatie van het stro vastgesteld. Verkleuring van het stro werd echter wel vastgesteld, wat wordt geassocieerd met eerdere schimmelgroei. Op het moment van deze inspectie was het vochtgehalte van het stro 28,4%. Bij dit hoge vochtgehalte is degradatie waarschijnlijk, dit werd echter niet vastgesteld. Thomson & Walker suggereren dat de schimmelgroei in de wand mogelijk wordt gestopt door gebrek aan voedingsstoffen na de eerste periode van schimmelgroei, en zo verdere degradatie van het stro vermeden wordt.

Takaguchi et al. voerde metingen uit in vier woningen met dampopen gevelopbouw en 1,5 keer zo veel hout als gemiddeld in de Japanse woning (Takaguchi et al., 2014). De woningen hebben HSB-wanden maar de exacte wandopbouw is onduidelijk in deze publicatie. De woningen bevinden zich in Tokyo, Japan. Met sensoren werd zowel de temperatuur in de ruimtes, als de temperatuur en de relatieve vochtigheid in het muurpakket gemonitord. Er is geen condensatie of risico op schimmelvorming vastgesteld. Hoe lang de metingen zijn uitgevoerd is onduidelijk. De gelimiteerde informatie in deze studie leiden ertoe dat er discussie ontstaat rondom de getrokken conclusies.

3.2.3 *Dampdrukverschil*

Voor diffusie is het belangrijk om te weten wat het dampdrukverschil tussen binnen en buiten is gedurende verschillende seizoenen. In koudere klimaten is de binnenlucht vaak warmer dan de buitenlucht en kan daarom een hogere concentratie waterdamp bevatten. Deze hogere concentratie is het gevolg van verhoogde temperatuur maar ook van gedrag en aanwezigheid van bewoners, ventilatie of bouwmaterialen (Simonson et al., 2005; Thomson & Walker, 2013). Daarnaast is de ontwerpwaarde van de relatieve vochtigheid in het interieur van belang. In veel woningen neemt de RV in de winter af, waardoor het waterdampdrukverschil over de gevel verkleint en het risico op waterschade kleiner is. Dit gebeurt echter in veel woningen niet, door een hogere bezetting of het gebruik van luchtbevochtigers. Voor een klimaat zoals in Tampere Finland is het verschil in dampdruk tussen binnen en buiten zo'n $6,5 \text{ g/m}^3$ wanneer een RV van 50% in het interieur wordt gekozen als ontwerpwaarde in de winter (J. O. Vinha et al., 2001).

3.2.4 *Dampopenheid van materialen*

De hoeveelheid vocht getransporteerd door diffusie is afhankelijk van de waterdampdiffusiecoëfficiënt van de toegepaste materialen. Bijvoorbeeld bij dampopen constructies is de snelheid van vochtdiffusie in de muur hoger bij een gipsplaat binnenwandafwerking dan bij een OSB-binnenwandafwerking. De

waterdampdiffusiecoëfficiënt van gipsplaat is immers 80% en 86,7% lager dan OSB voor dry cup en wet cup tests respectievelijk (Latif, Ciupala, et al., 2015).

Het vochtgehalte in de constructie is afhankelijk van de waterdampdruk van de binnenlucht en de waterdampdiffusiecoëfficiënt van de binnenafwerking of het damp scherm. Hoe hoger de waterdampdruk van de binnenlucht, hoe hoger het vochtgehalte in het regenscherm zal zijn en hoe lager de waterdampdiffusiecoëfficiënt van de binnenafwerking, hoe hoger het vochtgehalte in het regenscherm (Simonson et al., 2005). Het meest kritische punt in de constructie is het binnenoppervlak van het regenscherm (de OSB of ander plaatmateriaal aan de buitenzijde van de isolatie). Dit punt is het meest kritisch voor condensatie en schimmelvorming (J. Vinha, 2008).

3.2.5 *Mogelijkheid tot droging door het regenscherm heen*

De droging van het via diffusie geïnfiltreerde vocht in de constructie is afhankelijk van de waterdampdiffusiecoëfficiënt van het regenscherm. Bij een meer dampopen binnenwandafwerking zal het vochtgehalte achter het regenscherm ook hoger zijn. In dit geval moet de permeabiliteit en het droogpotentieel van het regenscherm ook groter zijn, om schade door opgestapeld vocht te vermijden (Simonson et al., 2005).

De droging van het via diffusie geïnfiltreerde vocht in de constructie is dus afhankelijk van de ratio waterdampdiffusiecoëfficiënt van het regenscherm ten opzichte van het damp scherm of de binnenwandafwerking. In noordelijke klimaten geldt de aanbeveling dat de waterdampdiffusiecoëfficiënt van de binnenwandafwerking ten minste 5 keer groter moet zijn dan de waterdampdiffusiecoëfficiënt van het buitenste oppervlak (J. O. Vinha et al., 2001). Maar uit simulaties door Vinha blijkt dat aan deze ratio in veel gevallen niet wordt voldaan (J. Vinha, 2008).

Het belang van de verhouding tussen de diffusieweerstanden aan de warme en koude zijde wordt ondersteund door meerdere studies (Colinart et al., 2013; Thue et al., 1996). Ook in een koud klimaat, kan een lage waterdampdiffusiecoëfficiënt van het regenscherm in zekere mate compenseren voor een lage waterdampdiffusiecoëfficiënt aan de binnenzijde van de constructie. Al moet deze diffusieweerstand aan de warme zijde boven een bepaalde limietwaarde blijven, welke afhankelijk is van de thermische prestaties van de constructie. Bij hogere isolatiediktes zal deze limiet hoger liggen (Thue et al., 1996).

3.2.6 *Belang regenscherm en voordelen geventileerde spouw*

Om het risico op schimmelvorming in dampopen constructies in te schatten is niet enkel de dampdiffusieweerstand van de binnenwandafwerking van belang. Het muurpakket dient in zijn geheel geëvalueerd te worden. Voornamelijk de dampdiffusieweerstand van het regenscherm en keuze van de gevelafwerking hebben invloed op de RV tussen het regenscherm en de isolatie. Uit meerdere studies blijkt dat de aanwezigheid van een geventileerde spouw een voordelige invloed heeft op de RV tussen het regenscherm en de isolatie (Dhakal et al., 2017; Lee et al., 2020).

Bij pleisterwerkgevelbekleding hebben ook de eigenschappen van deze pleisterlaag invloed op de RV tussen deze afwerkingslaag en de isolatie. Er kan het best gekozen worden voor een niet-waterabsorberende pleister op basis van cement (Bastien & Winther-Gaasvig, 2018; Piot et al., 2017).

3.2.7 *Effect hygroscopische materialen*

Biobased isolatiematerialen zijn hygroscopisch, deze materialen absorberen water en waterdamp uit een vochtige omgeving. Hierdoor kan het de vochtbalans in de wand beïnvloeden: het kan de droogtijd, eventuele condensatie en de RV tussen het regenscherm en de isolatie beïnvloeden.

Meerdere papers uit de beschouwde literatuur vergelijken dampopen HSB-wanden met hygroscopische en niet-hygroscopische isolatiematerialen.

Volgens de simulaties van Simonson et al. (2005) kan het toepassen van hygroscopische cellulose-isolatie in plaats van minerale wol de periode met condities geschikt voor schimmelvorming 2 tot 5 weken verkorten (Simonson et al., 2005). Dit is in tegenschelling tot de resultaten van andere studies, waaruit blijkt dat dampopen wanden met hygroscopische isolatiematerialen vergelijkbaar presteren met dampopen wanden met niet-hygroscopische isolatiematerialen (Geving et al., 2015; Latif et al., 2014; J. O. Vinha et al., 2001).

Uit de laboratoriumexperimenten van Latif et al. (2014) blijkt dat het risico op schimmelvorming en condensatie lager is bij hygroscopische hennepisolatie dan bij steenwolisolatie. Al kan het gebruik van hygroscopische isolatie het risico niet wegnemen (Latif et al., 2014).

Tijdens de testen uitgevoerd in Vinha et al. (2001) is vastgesteld dat, bij het gebruik van cellulose-isolatie in de samenstelling, de toename van de RV achter het dampscherm in de winter vertraagt (J. O. Vinha et al., 2001). Ook het optreden van condensatie en gunstige condities voor schimmelvorming wordt hierdoor vertraagd. Uiteindelijk komen de vochtgehaltes in de structuur overeen met deze van een vergelijkbare wandopbouw met minerale wol. Er vindt wel degelijk condensatie plaats in dampopen pakketten met cellulose-isolatie blootgesteld aan een binnenluchtvochtigheid van 4 g/m³ of 6 g/m³ boven de externe RV, in het noordelijke klimaat. Het onderzoek van Vinha (2008) concludeert ook dat de eisen voor de waterdampdiffusiecoëfficiënt van de binnenwandafwerking weinig verschillen tussen hygroscopische en niet-hygroscopische isolatiematerialen (J. Vinha, 2008).

Ook de studie van Geving et al. (2015) concludeerde dat houtvezelisolatie vergelijkbaar presteert als glaswol, met betrekking tot RV aan de buitenzijde van de isolatielaag (Geving et al., 2015). Afhankelijk van de gevelopbouw presteerde deze isolatielaag slechter dan glaswol in de winter en iets beter dan glaswol gedurende de zomercondities. Glaswol droogt namelijk sneller en wordt sneller nat dan de onderzochte houtvezelisolatie.

3.2.8 *Schimmelvorming in hennepbeton*

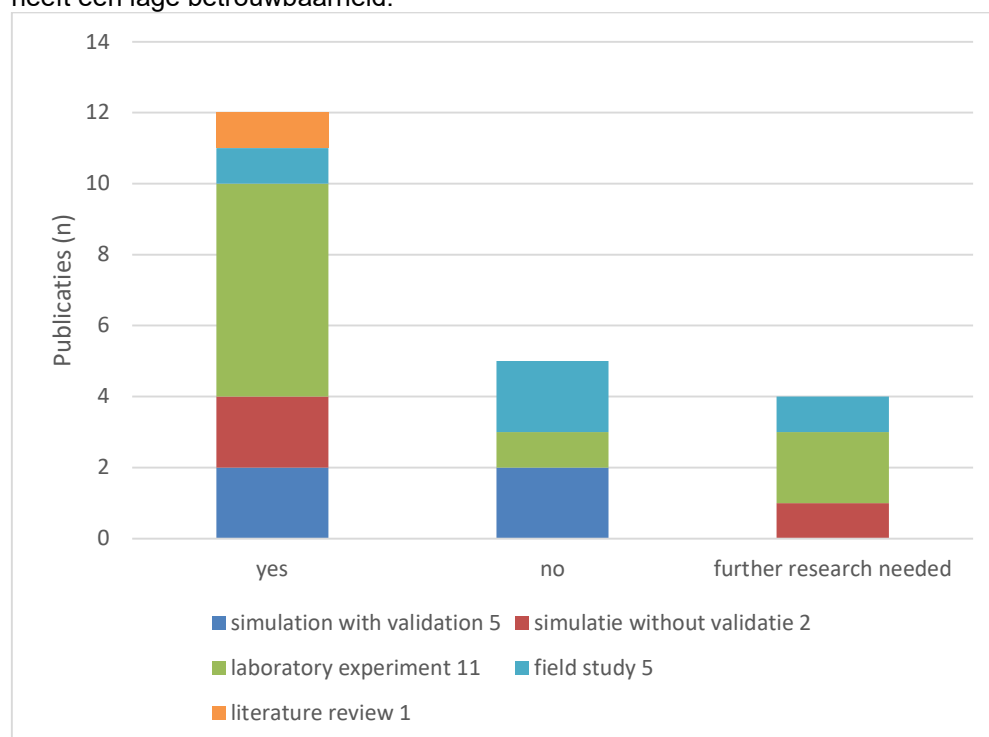
Hennepbeton wordt gemaakt uit een mengsel van hennepvezels, kalk en water.

Volgens Walker et al. (2014) is er nog weinig onderzoek gedaan naar de duurzaamheid van hennepbeton (Walker et al., 2014). Het materiaal wordt echter wel beschouwd als resistent tegen schimmelgroei en aantasting door insecten door het alkalisch gedrag van de kalk. Maar er zijn meerdere micro-organismen die juist goed gedijen in alkalische omstandigheden. In het onderzoek werden micro-organismen overgeënt op verschillende stalen hennepbeton. Ondanks pogingen om de geschikte omstandigheden voor groei te creëren bleek hennepbeton hier resistent voor te zijn. Daarom concludeert Walker et al. dat hennepbeton resistent is tegen biodegradatie in omgevingen met fluctuerende vochtgehaltes, zoals in een muurpakket kan voorkomen.

Dit is in tegenstelling tot het onderzoek van Raamets et al. (2021), waar stro en hennepbeton getest werden volgens de ASTM standaard methode D3273-00 “Standard Test Method for Resistance to Growth of Mold on the Surface of Interior Coatings in an Environmental Chamber” (Raamets et al., 2021). Schimmelvorming trad op bij 80% RV. De studie concludeerde dat hennepbeton, net als andere biobased materialen, kwetsbaar is voor aantasting door micro-organismen.

3.2.9 Discussie risico op schimmelvorming in dampopen constructies

In Figuur 5 is een verdeling gemaakt in publicaties waarbij wel, geen of geen eenduidig risico op schimmelvorming is gevonden. Een onderscheid is gemaakt tussen het type onderzoek. Hierbij wordt een praktijkstudie als betrouwbaarder aangemerkt dan een laboratoriumexperiment en een simulatie zonder validatie heeft een lage betrouwbaarheid.



Figuur 5. Verdeling beschouwde publicaties waarbij in een dampopen constructie een risico op schimmelvorming is geconstateerd ('ja'), er geen risico op schimmelvorming is gevonden ('nee') en welke nader onderzocht dienen te worden.

Tabel 3 geeft een uitgebreider overzicht van de studies zoals benoemd in Figuur 5.

Tabel 3. Gedetailleerder overzicht geïnccludeerde literatuur met dampopen constructies en onderzoek gericht op vaststellen risico op schimmelvorming

Paper	Type onderzoek	Type wand	Klimaat	Vocht in het interieur
Risico op schimmelvorming:				
(Levin & Gudmundsson, 1999)	Praktijkmetingen + simulatie	HSB	Stockholm, Zweden	4 g/m ³

(Latif, Lawrence, et al., 2015)	Laboratorium experiment	HSB	Wales, UK	40-50% RV + 90% RV gedurende 2 dagen
(Latif et al., 2014)	Laboratorium experiment	HSB	Wales, UK	RV: 40-50%
(J. Vinha & Käkälä, 2004)	Laboratorium experiment	HSB	Tampere, Finland	4-6g/m ³
(J. O. Vinha et al., 2001)	Laboratorium experiment	HSB	Tampere, Finland	4-6g/m ³
(Rose & McCaa, 1998)	Laboratorium experiment	HSB	Champaign, Illinois, VS	40-55% RV
(Thue et al., 1996)	Laboratorium experiment	HSB	Noorwegen	50-55% RV
(Hagentoft & Harderup, 1996)	Simulatie	HSB	Lulea, Zweden	3,5g/m ³
(Rode, 1998)	Simulatie	HSB	Denemarken	2-3,5g/m ³
(Lamoulie et al., 2012)	Simulatie	HSB	Nancy, Brest, La Pesse, Nice, Frankrijk	5g/m ³
Geen risico op schimmelvorming:				
(Takaguchi et al., 2014)	Praktijkmetingen	HSB	Tokyo, Japan	onduidelijk
(Simonson et al., 2005),	Praktijkmetingen	HSB	Helsinki, Finland	0,7-1,9g/m ³ 20-30% RV
(Piot et al., 2017)	Laboratorium experiment	hennepbeton	Le Bourget de Lac, Frankrijk	maart – juni: 170-200 g/h, 2-6 h/day
(Bastien & Winther-Gaasvig, 2018)	Simulatie	HSB	Lund, Zweden	35-55% RV
(Dhakal et al., 2017)	Simulatie	Hennepbeton	Ontario, Canada	onduidelijk
Verder onderzoek naar schimmelvorming nodig:				
(Moujalled et al., 2018)	Praktijkmetingen	Hennepbeton	Perigueux, Frankrijk	40-60% RV
(Rahim et al., 2017)	Laboratorium experiment	Hennepbeton	NVT	50-80%RV
(Gołębiewski & Pietruszka, 2021)	Simulatie	Hennepbeton	Polen (5 klimaatzones)	3rd class according to EN ISO 13788:2012
(Lee et al., 2020)	Simulatie	HSB	Japan (6 klimaatzones)	70% RV

Hieronder valt ook een beknopte literatuurstudie die de duurzaamheid van stroconstructies heeft onderzocht en een overzicht biedt in de beperkte huidige literatuur op dit onderwerp (Thomson & Walker, 2013).

De praktijkmetingen van Levin en Gudmundsson (1999) wijzen niet op risico op schimmelvorming in de 3 onderzochte dampopen woningen Stockholm. De gemiddelde vochtproductie in deze woningen ligt immers vrij laag. Als tweede stap in het onderzoek valideerden Levin en Gudmundsson echter een numeriek model aan de hand van de verzamelde praktijkmetingen. Hieruit blijkt dat bij de woningen schade aan de constructie waarschijnlijk is indien er een hoge vochtproductie van 4 g/m^3 in de woningen is (Levin & Gudmundsson, 1999).

Deze hogere vochtproductie ligt in lijn met de waarde voor de vochtproductie die door Vinha (2008) gehanteerd wordt voor het Finse klimaat. Deze ontwerpwaarde is gebaseerd op een uitgebreide veldtest op Finse eengezinswoningen met HSB, uitgevoerd door Vinha. Deze waarde is afhankelijk van de bezettingsgraad en of de lucht in de winter wordt bevochtigd (J. Vinha, 2008).

Verder wijzen 6 laboratoriumexperimenten op risico op schimmelvorming (Latif et al., 2014; Latif, Lawrence, et al., 2015; Rose & McCaa, 1998; Thue et al., 1996; J. Vinha & Käkälä, 2004; J. O. Vinha et al., 2001). Al deze laboratoriumexperimenten onderzochten HSB-wanden zonder dampscherm. De onderzochte klimaten zijn af te lezen in Tabel 3. Er is ook steeds met een voldoende hoge vochtproductie in het interieur gerekend. Namelijk vochtproductie van $4\text{-}6 \text{ g/m}^3$ (J. Vinha & Käkälä, 2004; J. O. Vinha et al., 2001) of constante RV tussen 40% en 55% gedurende het verloop van de test (Latif et al., 2014; Latif, Lawrence, et al., 2015; Rose & McCaa, 1998; Thue et al., 1996).

De duur van deze experimenten varieert van 14 dagen tot 3 jaar. Bij alle studies is het risico op schimmelvorming ingeschat op basis van monitoring van RV en temperatuur in het muurpakket, in combinatie met isoleren. Enkel bij Rose & McCaa (1998) werd er visueel schimmelvorming vastgesteld. Dit was dan ook het langst durende experiment, namelijk 3 jaar.

De simulatie zonder validatie van (Hagentoft & Harderup, 1996) voor een HSB wand, concludeerde dat er risico is op schimmelvorming. Er werd gerekend met een vochtproductie van $3,5 \text{ g/m}^3$. Zowel de berekeningen van (Rode, 1998) en de simulaties van (Lamoulie et al., 2012) concluderen dat een dampscherm noodzakelijk is om schimmelvorming te vermijden. Er werd respectievelijk gerekend met een vochtproductie van $2\text{-}3,5 \text{ g/m}^3$ en 5 g/m^3 , de Franse standaard ontwerpwaarde.

De praktijkonderzoeken van (Takaguchi et al., 2014) en (Simonson et al., 2005), deze stellen geen risico op schimmelvorming vast in de onderzocht woningen. De gemeten RV en temperatuur in het pakket waren zodanig, dat er geen gunstige situatie voor schimmelvorming optrad. De praktijkstudie van (Takaguchi et al., 2014) is echter onvoldoende beschreven. De duur van de metingen, vochtproductie, bezetting van de woning en samenstelling van de wand is onduidelijk. In de studie van (Simonson et al., 2005) is de relatieve vochtigheid verhoogd tijdens de winter, maar door temperaturen onder nul van de Finse winter, worden gunstige situaties voor schimmeligroei vermeden. In de woning werd een

gemiddelde vochtproductie van $1,9 \text{ g/m}^3$ gemeten in de slaapkamer en $0,7 \text{ g/m}^3$ in de hal. Dit komt overeen met de lage RV in de woning, namelijk $21\% \pm 3\%$ in de winter en $30\% \pm 7\%$ in de zomer. Dit is echter niet ongebruikelijk in woningen in koude klimaten.

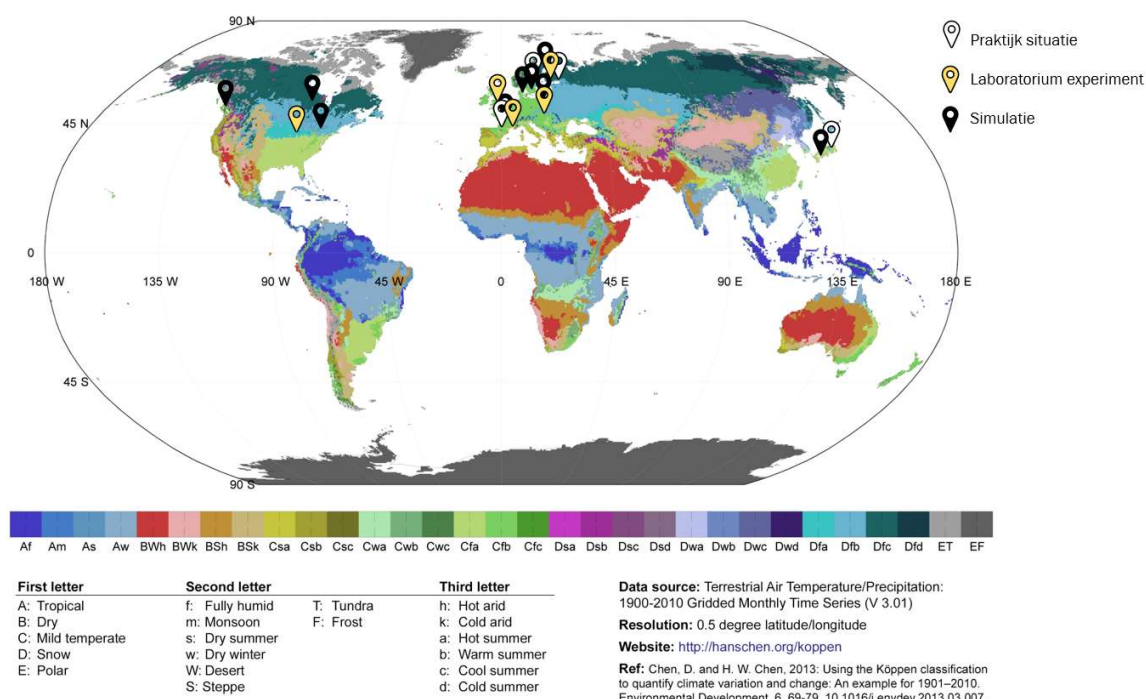
De experimentele opstelling van (Piot et al., 2017) onderzocht hennepbetonwand met pleisterlaag in het klimaat van La Bourget de Lac, Frankrijk. De publicatie concludeert dat er geen risico op schimmelvorming in de wand is. Tijdens het 1 jaar durende experiment is er enkel van maart tot juni vocht geproduceerd in het binnenklimaat. Tijdens de rest van het jaar kon de RV in het interieur vrij evolueren. Tenslotte concludeerden twee simulaties dat er geen risico is op schimmelvorming. Het gaat hier om de onderzoeken van (Bastien & Winther-Gaasvig, 2018) en (Dhakal et al., 2017). (Bastien & Winther-Gaasvig, 2018) simuleerde met WUFI een HSB-wand in Lund, Zweden. Er is gerekend met een vochtproductie van een gezin van 4 personen en een RV in het interieur tussen 30% en 45% in de winter en 35% en 55% in de zomer. Uit de simulatie bleek dat het toevoegen van een dampscherm aan de wandsamenstelling weinig invloed heeft op de vochtinhoud van de buitenste houtvezelplaat. (Dhakal et al., 2017) onderzocht een hennepbetonwand voor het klimaat van Ontario, Canada met een simulatie in WUFI. Er is rekening gehouden met vochtproductie in het interieur, maar de exacte hoeveelheid is niet beschreven in de paper.

Daarnaast zijn er nog drie studies waar het risico op schimmelvorming verder onderzocht dient te worden (Gołębiewski & Pietruszka, 2021; Moujalled et al., 2018; Rahim et al., 2017). De praktijkmetingen voor een hennepbeton woning in Perigueux, Frankrijk uitgevoerd door (Moujalled et al., 2018) tonen een hoge RV in het hennepbeton. De duur van deze verhoogde RV dient verder onderzocht te worden om het risico op schimmelvorming te kunnen inschatten. (Rahim et al., 2017) concludeert na de uitvoering van een laboratoriumexperiment op een hennepbetonwand zonder afwerking dat de kans op schimmelvorming laag is. Dit moet echter verder onderzocht worden voor wanden met binnen- en buitenwandafwerking. (Gołębiewski & Pietruszka, 2021) concludeert op basis van Glaser berekeningen dat er geen condensatie plaatsvindt voor dampopen HSB-wanden in het Poolse klimaat. Maar het risico op schimmelvorming dient verder onderzocht te worden. De simulatie met validatie van (Lee et al., 2020) concludeerde dat er voor de verschillende klimaatzones van Japan geen risico is op interne condensatie. Het risico op schimmelvorming werd hier niet verder bekeken.

De onderzochte HSB-wanden verschillen onderling sterk van samenstelling. Zo werd onderzoek gedaan naar verschillende types biobased isolatiematerialen zoals cellulose, hennepvezel, houtvezel isolatie. Daarnaast verschilt ook de binnenwandafwerking: geen binnenwandafwerking, gipsplaat al dan niet met pleisterlaag, kleiplaat met kleipleister (Bastien & Winther-Gaasvig, 2018) en OSB plaat binnenwandafwerkingen (Latif, Ciupala, et al., 2015) onderzocht. Daarnaast is er ook een sterke variatie in gekozen regenscherm zoals gipsplaat (Rode, 1998) (Levin & Gudmundsson, 1999), OSB plaat, houtvezelplaat (Lee et al., 2020) (Rode, 1998). Er zijn studies die een groot aantal materialen als regenscherm onderzoeken (Lamoulie et al., 2012; J. Vinha & Käkelä, 2004; J. O. Vinha et al., 2001). Ook voor de luchtdichting en waterdichtingsfolies werden verschillende materialen getest, zoals bitumen papier en polypropyleen folie.

De onderzochte hennepbetonwanden verschilden ook in de verschillende studies qua samenstelling. Aan het interieur werden verschillende types pleister toegepast, meestal op basis van kalk. Ook de samenstelling van het hennepbeton zelf varieert. Tenslotte varieert de buitenwandafwerking van een cement- of kalkpleisterlaag tot een geventileerde spouw met houten bekleding.

Figuur 6 geeft een overzicht van alle locaties waar de verschillende studies zijn uitgevoerd. Hierin is een grote spreiding te zien in geografische ligging.



Figuur 6. Locatie van studies in verschillende klimaatzones.

3.3 Invloed van biobased en dampopen bouwen op de gezondheid en ervaring van gebouwgebruikers

In de bouw is er een stijgende interesse om het hygroscopische karakter van biobased materialen te benutten en dampopen te bouwen (Latif et al., 2014). Deze dampopen constructies zouden de capaciteit hebben om de RV in het interieur te bufferen en het gezondheid en comfort van gebouwgebruikers en de luchtkwaliteit te verbeteren. Indien door buffering de binnenklimaatparameters binnen bepaalde grenzen vallen, wordt de conclusie getrokken dat er een comfortabel binnenklimaat is ontstaan. De relatie met daadwerkelijk gezondheidsindicatoren en de ervaring van gebruikers is niet aanwezig (Tabel 4 en Tabel 5).

Literatuur op het gebied van thermisch comfort legt veelal de relatie tussen gemeten binnenklimaatparameters en de ervaring van gebruikers door het afnemen van vragenlijsten. De relatie tussen gezondheid en comfort en de bufferende werking van RV, CO₂ of VOC in de binnenlucht is niet op een dergelijke wijze onderzocht en die relatie is in de beschouwde literatuur dan ook niet naar voren gekomen. Het onderstaande hoofdstuk focust op het bufferend effect van

dampopen constructies op van RV, CO₂ en VOC in de binnenlucht. De link tussen dit bufferend effect en gezondheid en comfort van gebouwgebruikers werd in de gevonden literatuur niet onderzocht en komt daarom in dit hoofdstuk niet aan bod.

Hygroscopische materialen kunnen vocht absorberen en desorberen en zo de RV in een gebouw bufferen. Er heerst de notie om de RV tussen 30 en 70%, of nog strikter, te reguleren. Dit zou astmatische reacties, mijten, schimmels en de overlevingskansen van besmettelijke bacteriën en virussen kunnen verminderen, echter is het niet bewezen op basis van wetenschappelijke literatuur (Bastien & Winther-Gaasvig, 2018; Loomans et al., 2021; Thomson & Walker, 2013). Daarnaast beïnvloedt de RV van de binnenlucht het thermisch en respiratoir comfort, de waargenomen luchtkwaliteit, de duurzaamheid van materialen en het energiegebruik van gebouwen (Alapieti et al., 2020). Om de RV te reguleren wordt gebruik gemaakt van luchtbehandeling in gebouwen. Vooral bij energetisch hoog presterende gebouwen zorgt dit voor een hoge energievraag voor ontvochtiging (Zhang et al., 2021).

De vochtabSORPTIE en -desorptie van hygroscopische materialen kan de RV reguleren bij veranderende temperatuur of RV in de lucht. Een permeabele gebouwschil kan een passief systeem zijn om de binnenluchtkwaliteit te verbeteren. De concentratie van vervuilende stoffen in het interieur zou namelijk verlaagd kunnen worden door diffusie van vervuilende gassen, zoals VOC's en CO₂, door de gebouwschil. Daardoor kan bij een dampopen gebouwschil een vergelijkbaar binnenklimaat verkregen worden bij lagere ventilatiehoeveelheid. Dit zou een energetische besparing kunnen opleveren (Simonson et al., 2005).

De invloed van hygroscopische isolatiematerialen op binnenluchtkwaliteit en relatieve vochtigheid in het interieur is door meerdere studies onderzocht. Dit gebeurde voornamelijk aan de hand van simulaties op basis van fysische modellen. Naast bufferen van de RV is ook onderzoek gedaan naar buffering van VOC's en schadelijke stoffen in het interieur.

(Lee et al., 2020) en (Kurnitski et al., 2007) onderzochten het bufferend effect van muren met cellulose-isolatie met een numerieke simulatie. (Rode, 1998) voerde een 1-dimensionale simulatie uit voor het warmte- en vochttransport door een HSB-wand met verschillende samenstellingen. Hierbij werd de binnenlucht gemodelleerd als een laag in de wandopbouw. (Shang & Tariku, 2021) simuleerde in HAMT (Heat Air and Moisture Transport) en HAMfitplus voor verschillende ventilatiedebieten en bezettingsgraad. Uit deze simulatie blijkt dat een gevel van hennepbeton de dagelijkse variatie van de RV in het interieur dempt. De condensatie op het raam bij hoge bezetting is minder bij de aanwezigheid van hennepbeton. Op basis van laboratoriumonderzoek vond (Niemi et al., 2017) een lineair verband tussen buffering van CO₂ en waterdamp door hygroscopische materialen. Daarnaast werd de RV en CO₂ in een ruimte berekend. (Tran Le et al., 2021) concludeerde dat VOCs en waterdamp op een gelijke manier door poreuze materialen getransporteerd worden. Dit verband werd echter in de publicatie niet verder onderzocht. Daarnaast hanteerden ze een gevalideerd model in SPARK om VOCs en RV in een ruimte te simuleren.

(Straube & DeGraauw, 2001) concludeerde op basis van een simulatie dat dampopen constructies met hygroscopische materialen fluctuaties in de RV in het interieur kunnen bufferen. Daarnaast is ook een veldmeting uitgevoerd maar deze

is onvoldoende beschreven om de conclusies daarvan goed te kunnen interpreteren. Het interieur in de testwoning is constant gehouden bij $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ en $50\% \pm 5\%$ RV. Enkel de RV in de isolatielaag is gemeten. De samenstelling van de twee onderzochte muurpakketten is ook zeer verschillend en niet volledig gedocumenteerd. Dit maakt dat de resultaten onvoldoende te vergelijken zijn. (Simonson et al., 2001) simuleerde een slaapkamer voor twee personen met dampopen muursamenstelling in verschillende klimaten. Het onderzochte muurpakket is een wand met cellulose-isolatie waarbij verschillende afwerkingslagen zijn onderzocht. Het grootste aandeel van de beschouwde literatuur concludeert dat er een buffering van de dagelijkse piek in RV in het interieur plaatsvindt. Deze buffering varieert tussen 8,6% (Tran Le et al., 2021) en 60% (Shang & Tariku, 2021). De resultaten van deze simulatiestudies zijn terug te vinden in Tabel 4.

In de geïncludeerde literatuur zijn twee praktijkstudies terug te vinden. (Simonson et al., 2004) onderzocht de slaapkamer in een dampopen testwoning. De buitengevel daarvan is een HSB-wand met bouwpapier luchtdichting, houtvezelisolatie en een geventileerde spouw. In de ruimte is de vochtproductie van twee slapende personen nagebootst met een bevochtigingstoestel. Daarnaast zijn er tracergassen aan de ruimte toegevoegd. Hierbij zijn de ventilatie, RV en gasconcentraties in de ruimte gemeten bij verschillende ventilatiehoeveelheden. Dit experiment is in tweevoud uitgevoerd, eens in de originele ruimte en in dezelfde ruimte die werd afgeplakt met dampdichte folie.

De resultaten tonen aan dat transport tussen de binnenlucht en de dampopen hygroscopische gebouwschil de concentratie CO_2 , SF_6 en waterdamp kan beïnvloeden. De metingen tonen aan dat diffusie de effectieve ventilatie met 10% verbetert voor CO_2 en met 2% voor SF_6 bij een ontwerp ventilatiedebiet van 0,5 ACH (luchtwisselingen per uur). In de experimenten is de RV piek 's nachts met 15% gereduceerd bij een gemiddelde temperatuur van 27°C . Dit is dezelfde absolute dampdruk als bij 21% RV bij 22°C .

(Kurnitski et al., 2007) onderzocht 46 woningen met HSB-constructie in de regio van Helsinki en Tampere. Gedurende juli en augustus is de temperatuur en RV in de slaapkamers en/of leefruimte van deze woningen gemeten. De woningen zijn geclassificeerd naar dampopen of dampdichte muurpakketten, hygroscopisch of niet-hygroscopisch afwerkingsmateriaal en type ventilatie. De dagelijkse variatie in RV was significant lager in woningen met balansventilatie en in woningen met hygroscopische afwerkingsmaterialen. De dampdichting van het muurpakket had geen significante invloed op de dagelijkse variatie in temperatuur, RV en absolute vochtigheid in de onderzochte ruimtes.

De variatie tussen de woningen onderling was echter groter dan de gevonden variatie tussen hygroscopische en niet-hygroscopische constructies. Dit geeft aan dat de buffering die blijkt uit simulaties mogelijk verlaagd wordt door het openen van ramen en meubilair. Dit zijn factoren die in simulaties niet worden meegenomen.

(Simonson et al., 2004) concludeert dat om dit bufferende effect te bereiken het waarschijnlijk niet noodzakelijk is dat de gehele muuropbouw dampopen en hygroscopisch wordt uitgevoerd. Hygroscopische materialen die in de wandopbouw het dichtst bij het interieur geplaatst worden hebben hier immers de grootste impact op de RV van het binnenklimaat. De hoeveelheid hygroscopisch en dampopen materiaal dat nodig is om deze buffering te bereiken is afhankelijk van de

penetratiediepte van het vocht. Hier is verder onderzoek naar nodig. Dit is in overeenstemming met (Latif, Lawrence, et al., 2015) die de penetratiediepte van verschillende biobased isolatiematerialen berekende tussen 6 en 12 cm. (Piot et al., 2017) schatte de penetratiediepte voor dagelijkse fluctuaties voor onafgewerkt hennepbeton in op 5,8 cm. (Straube & DeGraauw, 2001) stelt vast dat in een simulatie een materiaaldikte groter dan 4 tot 6 cm weinig tot geen invloed heeft op het bufferende effect. De penetratiediepte voor gipsplaat is echter maar 0,5 cm (Rode, 1998).

(Simonson et al., 2001) concludeert dat wanneer een hygroscopische binnenwandafwerkingsplaat gebruikt wordt, de hygroscopische isolatie achter deze afwerkingslaag nog weinig effect heeft op het bufferend effect. De RV in het interieur wordt dan bijna niet beïnvloed door de hygroscopiciteit van de isolatie of de dampdichtdoorlaatbaarheid van de laag achter de afwerking. Hygroscopische isolatie achter een niet-hygroscopische maar dampopen binnenwandafwerkingsplaat presteert gelijk aan een hygroscopische binnenwandafwerking.

Tabel 4. Overzicht geïncludeerde literatuur gericht op bepalen bufferend effect van dampopen en hygroscopische constructies

Type onderzoek	Onderzocht materiaal	Buffering piek concentratie	Referentie
Simulatie met validatie	HSB-wand met cellulose-isolatie en dampopen luchtdichtingsfolie, gipsplaat en gipspleister als binnenwandafwerking	RV: ja	(Lee et al., 2020)
Simulatie met validatie	HSB-wand met cellulose-isolatie en verschillende binnenwandafwerkingen	RV (zonder afwerking): Ja RV (met afwerking): Nee	(Rode, 1998)
Simulatie met validatie	Hennepbeton met kalkpleisterlaag als binnen- en buitenwandafwerking	RV: 60%	(Shang & Tariku, 2021)
Simulatie zonder validatie	Diffusie-open gebouwschil	CO ₂ : ja RV: ja	(Niemelä et al., 2017)
Simulatie met validatie	Hennepbeton met kalkpleisterlaag (aannname: gelijkenis tussen vocht en VOC transport door poreuze materialen)	VOC: 15% RV: 8,6%	(Tran Le et al., 2021)
Simulatie met validatie	Strobalen met kalkpleister, cementgebonden houtvezel platen met kalkpleister	RV: ja	(Straube & DeGraauw, 2001)

Simulatie met validatie	Dampopen muuropbouw met cellulose-isolatie met diverse typen verf, binnenwandafwerking en luchtdichting	RV: 15-35%	(Simonson et al., 2001)
Simulatie met validatie	HSB-wand met houtvezelplaat binnenwandafwerking en cellulose-isolatie	RV: 10-12%	(Kurnitski et al., 2007)
Praktijk onderzoek	46 woningen met HSB-constructie	Minimaal effect	(Kurnitski et al., 2007)
Praktijk onderzoek	HSB-wand met bouwpapier luchtdichting, houtvezel isolatie en een geventileerde spouw	RV: 21% CO ₂ : 10% SF ₆ : 2%	(Simonson et al., 2004)

De buffering van RV door hygroscopische materialen is een complex fysisch fenomeen waar meerdere processen zoals dampdiffusie, capillaire stroming, verdamping en condensatie een rol in spelen. Daardoor is het niet eenvoudig te berekenen en wordt het meestal verwaarloosd in een gebouwoontwerp omdat ventilatie een snellere aanpassing aan de RV kan realiseren. Om het 'moisture buffering effect' van materialen te kwantificeren ontwikkelde het NordTest project de Moisture Buffering Value (MBV) (Rode et al., 2005). De MBV is de hoeveelheid vocht die door een materiaal wordt geabsorbeerd of gedesorbeerd bij een RV verandering in de omringende lucht. Het kan worden toegepast om verschillende hygroscopische materialen te vergelijken. Het bufferend effect van hygroscopische materialen in een ruimte wordt echter ook beïnvloed door ventilatie en vochtproductie in de ruimte, niet enkel door de materiaaleigenschappen. Het NordTest project ontwikkelde daarbij een testprotocol om middels experimenten de MBV van materialen en systemen te bepalen. Daarnaast bestaan er ook vergelijkbare methodes zoals de Japanese Industrial Standard (JIS) en de Draft International Standard (DIS) (Alapieti et al., 2020). In alle beschouwde literatuur op dit onderwerp is het Nordtest protocol gehanteerd.

Lelièvre et al. (2015), Latif et al. (2015), en Romano et al. (2019) bepaalden experimenteel de MBV volgens het Nordtest protocol (Latif, Lawrence, et al., 2015; Lelièvre et al., 2015; Romano et al., 2019). In tegenstelling tot (Asli et al., 2021), deze studie stelde de MBV van hennepbeton vast door een numerieke simulatie te maken van de condities zoals geformuleerd in het Nordtest protocol. Lelièvre et al., Astli et al., en Latif et al. bekeken hennepbeton zonder en met verschillende soorten afwerkingslagen (Asli et al., 2021; Latif, Lawrence, et al., 2015; Lelièvre et al., 2015). (Romano et al., 2019) bepaalde experimenteel de MBV van meerdere biobased isolatiematerialen en PET-isolatie. De resultaten zijn terug te vinden in Tabel 5.

Tabel 5. Overzicht geïncorporeerde literatuur gericht op bepalen MBV van biobased isolatie met verschillende afwerkingslagen

Type onderzoek	Onderzocht materiaal	MBV (g/(m ² .%RH))	Referentie
Simulatie met validatie	Hennepbeton zonder afwerkingslaag	1,82 - 3,02	(Asli et al., 2021)
Laboratorium experiment/ simulatie met validatie	Hennepbeton	Zonder afwerkingslaag: 1,9 Met kalkpleisterlaag: 1,2	(Lelièvre et al., 2015)
Laboratorium experiment	Biobased isolatie materialen zonder afwerkingslagen	Wol isolatie (type 1): 1,88 Wol isolatie (type 2): 1,23 Saw mill residue: 2,06 Wood fibre: 1,25	(Romano et al., 2019)
Laboratorium experiment	Hennepbeton	Hennepbeton: 3,47 Hennepbeton met kalkpleister: 3,21 Hennepbeton met kalkpleister en verf: 1,22 Met ademend membraan of gipsplaat in de afwerking: <1,61	(Latif, Lawrence, et al., 2015)

De werkelijke buffering van de dagelijkse variatie in RV in het binnenklimaat is echter afhankelijk van meerdere factoren, zoals de materiaaleigenschappen en het blootgesteld oppervlak. Maar ook de vochtproductie, ventilatie, en de afwerking van het muurpakket hebben hier invloed op.

Het bufferend effect van hennepbeton neemt toe naarmate de bezetting, en dus de vochtproductie, toeneemt of de ventilatiegraad afneemt (Shang & Tariku, 2021). Ook de afwerking van de muur is hierbij van belang. Dit wordt in (Asli et al., 2021) en (Romano et al., 2019) echter niet meegenomen. Rode stelt dat het gebruik van isolatiemateriaal met een hoge vochtcapaciteit een bufferend effect op de RV kan hebben (Rode, 1998). Maar dit effect verdwijnt zodra de vochtuitwisseling met het isolatiemateriaal gehinderd wordt door een materiaal met hogere waterdiffusieweerstand. Zo is 13 mm gipsplaat voldoende om dit effect te niet te doen. Dit effect neemt ook significant af indien (latex) verf wordt toegepast (Shang & Tariku, 2021).

4 Discussie

Gebruikte zoektermen geven beperkt resultaat voor dampopen bouwen met volledig biobased constructies. Veel studies zijn ook gericht op het bepalen van materiaaleigenschappen en het ontwikkelen van nieuwe biobased materialen. Er is weinig onderzoek naar schimmelvorming in volledig dampopen wandconstructies beschikbaar (zie Tabel 3).

Er is wel een groot aantal publicaties over biobased folies die als dampscherm dienen voor meerdere toepassingen, waaronder de bouw. Deze zijn buiten het onderzoek gelaten om de focus op volledig dampopen bouwen met biobased materialen te houden.

In dit rapport wordt gekeken naar met name houtskeletbouw (HSB) met biobased isolatiemateriaal en hennepbeton wanden, beide zonder dampscherm of sterk dampremmende laag.

4.1 Risico op schimmelvorming

Het merendeel van de beschouwde literatuur geeft uitspraken dat er een verhoogd risico op schimmelvorming mogelijk is bij dampopen bouwen door een risico op inwendige condensatie. Een vijftal studies concluderen dat er weinig kans is op schimmelvorming. Het gaat hier over twee praktijkonderzoeken, één laboratoriumonderzoek en twee simulatiestudies met validatie. Eén van de twee praktijkstudies is te summier beschreven om de waarde ervan te kunnen beoordelen. Bij de tweede praktijksituatie was de vochtproductie in het interieur zeer laag. Ook bij het laboratoriumexperiment wordt er maar beperkt vocht geproduceerd in het binnenklimaat.

Voor alle studies geldt dat er geen studie beschikbaar is in een praktijksetting waar ook daadwerkelijk in de constructie is bekeken of er schimmelvorming voorkwam. In de literatuurstudie van (Thomson & Walker, 2013) werd in de wand van een testgebouw visueel geïnspecteerd voor schimmelvorming. Dit hield echter geen rekening met realistische omstandigheden. Dit type onderzoek wordt niet vaak uitgevoerd omdat dit een destructief karakter heeft. Het geeft wel eenduidig inzicht in wat er zich in de constructie voordoet. Om dit te benaderen wordt in een aantal studies gebruik gemaakt van temperatuur en relatieve vochtigheidsmetingen om af te leiden of er een kans op inwendige condensatie ontstaat en er een gunstig klimaat voor schimmelvorming is. Deze studies vinden veelal plaats onder laboratoriumomstandigheden.

Het grootste aandeel van de studies maakt gebruik van laboratoriumexperimenten om het risico op schimmelvorming te onderzoeken. Hierbij wordt een wandpakket blootgesteld aan een gesimuleerd binnen- en/of buitenklimaat en in een enkel geval aan het werkelijk klimaat van het laboratorium of de buitenomgeving. Daarbij wordt de temperatuur en RV op verschillende posities in het pakket gemonitord. Het nadeel van deze methode is de vaak korte duur van de onderzoeken, die meestal slechts enkele weken duren.

Een deel van de studies maakt vervolgens gebruik van simulatiemodellen om de kans op schimmelmoei te voorspellen. Deze methode heeft als voordeel dat er snel

een inschatting gemaakt kan worden over een langere tijdsperiode van de kans op inwendige condensatie – en afgeleid daarvan of er een gunstig klimaat is voor schimmelvorming. Deze simulatiemodellen dienen echter wel gevalideerd te zijn. De aannames die worden gedaan worden niet altijd goed beschreven in de beschouwde literatuur, waardoor de betrouwbaarheid van de resultaten niet voldoende gecontroleerd kan worden.

In bijna geen enkele publicatie is een relatie gelegd tussen schimmelvorming en mogelijke impact op materiaaleigenschappen en prestaties van het constructie-element over langere tijd. Enkel de studies van Latif et al. (2014) en Latif et al. (2015) onderzochten wel de U-waarden van een wand bij verhoogde RV ten gevolge van dampopen bouwen (Latif et al., 2014; Latif, Ciupala, et al., 2015). Onderzoek naar het verloop van schimmelgroei en degradatie in een dampopen constructie ontbreekt echter.

4.2 Relatie dampopen bouwen en comfort en gezondheid van gebruikers

Onderzoek naar bufferende afwerkingslagen en CLT-wanden is niet geïnccludeerd. Enkel onderzoek naar dampopen muurpakketten met hygroscopische biobased isolatie is geïnccludeerd.

In deze literatuurstudie is veel onderzoek gevonden naar de relatie tussen hygroscopische isolatiematerialen en binnenklimaatparameters zoals relatieve vochtigheid, CO₂ en andere VOC's. In deze onderzoeken staat vaak de buffering van de dagelijkse fluctuaties centraal. De binnenwandafwerking wordt daarbij niet altijd meegenomen (zie Tabel 4).

Indien door buffering de binnenklimaatparameters binnen bepaalde grenzen vallen, wordt de conclusie getrokken dat er een comfortabel binnenklimaat is ontstaan. De relatie met daadwerkelijk gezondheidsindicatoren en de ervaring van gebruikers is niet aanwezig (Tabel 4 en Tabel 5).

De relatie tussen dampopen bouwen en het bufferen van bepaalde binnenklimaatparameters wordt over het algemeen onderzocht aan de hand van simulatiemodellen (Figuur 5). In deze modellen komt naar voren dat met name de hygroscopische eigenschappen van de afwerkingslaag, en de eerste centimeters van een wandopbouw, bepaalt of er veel of weinig buffering van vocht plaatsvindt (Simonson et al., 2005). Het gebruiken van een te dampdichte afwerkingslaag kan het bufferend effect – van bijvoorbeeld hygroscopische isolatie – teniet doen (Rode, 1998; Shang & Tariku, 2021). Uit simulaties blijkt dat het bufferend effect afneemt bij toenemende ventilatie. Het is echter onduidelijk of de noodzaak voor ventilatie afneemt bij dampopen bouwen (Shang & Tariku, 2021).

Het is niet duidelijk uit de beschouwde literatuur hoe groot het bufferend effect in de praktijk zal zijn. De buffering van RV door hygroscopische materialen is een complex fysisch fenomeen waar meerdere invloedsfactoren van belang zijn. Bijna alle studies zijn gebaseerd op simulaties dit is vaak een ideale representatie van de werkelijkheid. Uit het praktijkonderzoek van (Kurnitski et al., 2007) blijkt dat het effect in de praktijk waarschijnlijk lager zal zijn dan de resultaten uit simulaties.

Literatuur op het gebied van thermisch comfort legt veelal de relatie tussen gemeten binnenklimaatparameters en de ervaring van gebruikers. Deze relatie is in de gevonden literatuur niet naar voren gekomen.

5 Conclusie

Aan de hand van de geformuleerde onderzoeksvragen worden de volgende conclusies getrokken.

3. *Hoe groot is het risico op schimmelvorming in een dampopen constructie bestaande uit biobased materialen?*

Het merendeel van de studies concludeert een verhoogd risico op schimmelvorming op basis van metingen aan temperatuur en relatieve vochtigheid in laboratoriumomstandigheden en een risico-analyse op basis van de kans op schimmelgroei bepaald met behulp van simulaties. Er zijn geen praktijksituaties waarin visueel onderzoek wordt gedaan naar het risico op schimmelvorming. Door het gebrek aan praktijkstudies, is er op basis van de beschouwde literatuur onvoldoende inzicht in het risico op schimmelvorming in een dampopen constructie bestaande uit biobased materialen

4. *Wat is de invloed van een dampopen constructie bestaande uit biobased materialen op de gezondheid en comfort van de gebouwgebruikers?*

Op basis van de beschouwde literatuur wordt geen directe relatie gelegd tussen dampopen constructies bestaande uit biobased materialen en gezondheidsindicatoren of comfort van bewoners. De beschouwde literatuur onderzoekt veelvuldig het effect van hygroscopische materialen op de relatieve vochtigheid in een ruimte. Indien de relatieve vochtigheid binnen bepaalde grenzen valt wordt dit als indicator gezien voor een gezond en comfortabel binnenklimaat en gerelateerd aan gezondheid van de gebouwgebruiker. Er kan geen eenduidige conclusie worden getrokken op basis van de beschouwde literatuur.

5.1 Aanbeveling

Op basis van de uitgevoerde literatuurstudie blijkt dat er veel onderzoek plaatsvindt naar materiaaleigenschappen en materiaalprestaties op materiaalniveau van biobased materialen en (hybride) constructies. Experimenteel onderzoek in praktijksituaties naar het risico op schimmelvorming of het effect van dampopen bouwen op gezondheidsindicatoren is schaars. Verder onderzoek biedt mogelijkheden om deze kennislacunes te vullen.

6 Ondertekening

Delft, 13 juni 2023

Ir. L. Claes
Auteur

Ing. E.M.R. Henquet
Project manager

Ir.ing. M. Steins
Research manager
Building Materials & Structures

7 Literatuur

- Alapieti, T., Mikkola, R., Pasanen, P., & Salonen, H. (2020). The influence of wooden interior materials on indoor environment: a review. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(4), 617–634. <https://doi.org/10.1007/S00107-020-01532-X>
- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology: Theory and Practice*, 8(1), 19–32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Asli, M., Brachelet, F., Sassine, E., & Antczak, E. (2021). Thermal and hygroscopic study of hemp concrete in real ambient conditions. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102612>
- Bastien, D., & Winther-Gaasvig, M. (2018). Influence of driving rain and vapour diffusion on the hygrothermal performance of a hygroscopic and permeable building envelope. *Energy*, 164, 288–297. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.07.195>
- Colinart, T., Glouannec, P., Pierre, T., Chauvelon, P., & Magueresse, A. (2013). Experimental Study on the Hygrothermal Behavior of a Coated Sprayed Hemp Concrete Wall. *Buildings*, 3, 79–99. <https://doi.org/10.3390/buildings3010079>
- Dhakal, U., Berardi, U., Gorgolewski, M., & Richman, R. (2017). Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3655–3664. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.10.102>
- Geving, S., Lunde, E., & Holme, J. (2015). Laboratory investigations of moisture conditions in wood frame walls with wood fiber insulation. *Energy Procedia*, 78, 1455–1460. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.11.170>
- Gołębiewski, M., & Pietruszka, B. (2021). Risk of interstitial condensation in outer walls made of hemp-lime composite in Polish climatic conditions. *Archives of Civil Engineering*, 67(4), 107–121. <https://doi.org/10.24425/ACE.2021.138489>
- Goodhew, S., Griffiths, R., & Woolley, T. (2004). An investigation of the moisture content in the walls of a straw-bale building. *Building and Environment*, 39(12), 1443–1451. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2004.04.003>
- Hagentoft, C. E., & Harderup, E. (1996). Moisture conditions in a north facing wall with cellulose loose fill insulation: Constructions with and without vapor retarder and air leakage. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 19(1), 228–243.
- iea. (2019). *2019 Global Status Report for Buildings and Construction Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*. www.iea.org
- Kurnitski, J., Kalamees, T., Palonen, J., Eskola, L., & Seppänen, O. (2007). Potential effects of permeable and hygroscopic lightweight structures on thermal comfort and perceived IAQ in a cold climate. *Indoor Air*, 17(1), 37–49. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0668.2006.00447.X>
- Lamoulie, J., Pompéo, C., & Garnier, G. (2012). Optimizing transfer of moisture in timber frame buildings. *10th International Conference on Healthy Buildings 2012*, 3, 1887–1892.
- Latif, E., Ciupala, M. A., Tucker, S., Wijeyesekera, D. C., & Newport, D. J. (2015). Hygrothermal performance of wood-hemp insulation in timber frame wall panels with and without a vapour barrier. *Building and Environment*, 92, 122–134. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.04.025>
- Latif, E., Ciupala, M. A., & Wijeyesekera, D. C. (2014). The comparative in situ hygrothermal performance of Hemp and Stone Wool insulations in vapour open timber frame wall panels. *Construction and Building Materials*, 73, 205–213. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.09.060>

- Latif, E., Lawrence, M., Shea, A., & Walker, P. (2015). Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime. *Building and Environment*, 93(P2), 199–209.
<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.07.011>
- Lee, H., Ozaki, A., Lee, M., & Yamamoto, T. (2020). Humidity control effect of vapor-permeable walls employing hygroscopic insulation material. *Indoor Air*, 30(2), 346–360. <https://doi.org/10.1111/INA.12622>
- Lelièvre, D., Colinart, T., & Glouannec, P. (2015). Modeling the moisture buffering behavior of a coated biobased building material by including hysteresis. *Energy Procedia*, 78, 255–260.
<https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.11.631>
- Levin, P., & Gudmundsson, K. (1999). Moisture in Constructions with Loose-Fill Insulation and no Vapour Barrier. *Nordic Journal of Building Physics*, 2.
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-13288>
- Loomans, M. G. L. C., Huisman, E., Kompatscher, K., Traversari, A. A. L., Kort, H. S. M., & Maassen, W. (2021). *Bevochtigingseisen in de zorghuisvesting: Kennisbasis*.
- Martin Sobota, Isabel Driessen, M. H., & (CITYFÖRSTER). (2021). *Carbon-based design*.
- Moujalled, B., Aït Ouméziane, Y., Moissette, S., Bart, M., Lanos, C., & Samri, D. (2018). Experimental and numerical evaluation of the hygrothermal performance of a hemp lime concrete building: A long term case study. *Building and Environment*, 136, 11–27.
<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.03.025>
- Peuhkuri, R., Rode, C., & Hansen, K. K. (2008). Non-isothermal moisture transport through insulation materials. *Building and Environment*, 43(5), 811–822.
<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2007.01.021>
- Piot, A., Béjat, T., Jay, A., Bessette, L., Wurtz, E., & Barnes-Davin, L. (2017). Study of a hempcrete wall exposed to outdoor climate: Effects of the coating. *Construction and Building Materials*, 139, 540–550.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.12.143>
- Raamets, J., Lokko, L., Ruus, A., Kalamees, T., & Muoni, K. (2021). Assessment of moisture and mould of hempcrete and straw panels. *Journal of Physics: Conference Series*, 2069(1), 012194. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012194>
- Rahim, M., Douzane, O., Tran Le, A. D., Promis, G., & Langlet, T. (2017). Experimental investigation of hygrothermal behavior of two bio-based building envelopes. *Energy and Buildings*, 139, 608–615.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.01.058>
- Romano, A., Bras, A., Grammatikos, S., Shaw, A., & Riley, M. (2019). Dynamic behaviour of bio-based and recycled materials for indoor environmental comfort. *Construction and Building Materials*, 211, 730–743.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.02.126>
- Rose, W. B., & McCaa, D. J. (1998). Temperature and moisture performance of wall assemblies with fiberglass and cellulose insulation. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings*.
- Shang, Y., & Tariku, F. (2021). Hempcrete building performance in mild and cold climates: Integrated analysis of carbon footprint, energy, and indoor thermal and moisture buffering. *Building and Environment*, 206.
<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108377>
- Simonson, C. J., Ojanen, T., & Salonvaara, M. (2005). Moisture performance of an airtight, vapor-permeable building envelope in a cold climate. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28(3), 205–226.
<https://doi.org/10.1177/1097196305048628>
- Simonson, C. J., Salonvaara, M., & Ojanen, T. (2001). Improving indoor climate and comfort with wooden structures. *VTT Publications*,

- Straube, J. F., & DeGraauw, J. P. (2001). Indoor air quality and hygroscopically active materials. *ASHRAE Transactions*, 107 PART. 1, 444–450.
- Takaguchi, H., Nakajima, Y., Kawamura, K., Uchida, S., Tonooka, Y., & Sagane, A. (2014). Research on the environmental performance of a natural material wooden house. *Energy Procedia*, 61, 1677–1680. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2014.12.190>
- Thomson, A., & Walker, P. J. (2013). Condition monitoring and durability assessment of straw bale construction. *Uniwersytet Śląski*, 791–798. <https://doi.org/10.2/JQUERY.MIN.JS>
- Thue, J. V., Skogstad, H. B., & Homb, A. (1996). Wood frame walls in cold climate-vapour barrier requirements. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 20(7), 63–75.
- Vinha, J. (2008). Analysis method to determine sufficient water vapour retarder for timber-framed walls. *Buidling Physics 2008- 8th Nordic Symposium*. www.tut.fi
- Vinha, J., & Käkälä, P. (2004). Drying rate of timber-Framed external wall assemblies in nordic climate. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings*.
- Vinha, J. O., Käkälä, P., & Lindberg, R. (2001). Moisture behavior of timber-framed external wall structures in nordic climate. *IAQ Conference*.
- Walker, R., Pavia, S., & Mitchell, R. (2014). Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes. *Construction and Building Materials*, 61, 340–348. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.02.065>
- Zhang, X., Qin, M., & Zu, K. (2021). Recent progress on hygroscopic materials for indoor moisture buffering. *J. Phys*, 12003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012003>

Bijlage A Zoektermen en zoekstrings

schimmel	condensatie/ hoge RV	dampopen	constructie	bio-based	gezondheid/comfort	hygrothermische prestaties
fungus fungi funguses mould mold mildew rot	condensation critical moisture level humidity moisture problems moisture infiltration water infiltration	dampregulerend bouwen dampdiffusie open bouwen vapour open vapour diffusion vapour transmission vapour permeability vapour transfer vapour barrier vapour absorption vapor open vapor diffusion vapor transmission vapor permeability vapor transfer vapor barrier vapor absorption moisture migration moisture transport moisture permeability permeable diffusion open diffusion-open breathable breathability hygroscopic moisture buffering mass transfer hygroscopicity	bouwen building envelope wall building assemblies building structures building component building material building materials	bio-based organic renewable natural bio-based bio aggregate wood timber seaweed mycelium hemp insulation straw insulation cork insulation wood fibre insulation compost hemp lime cellulose hemp fibre wood fiber insulation hemp fiber	health well-being symptom symptoms percent dissatisfied indoor humidity indoor climate quality of life sick building syndrome	hygrothermal performance hygrothermal behaviour hygrothermal material properties hygrothermal properties durability hygrothermal behavior

1	schimmel - dampopen - constructie - bio-based	("fungus" OR "fungi" OR "funguses" OR "mould" OR "mold " OR "mildew" OR "rot") AND ("vapour open" OR "vapour diffusion" OR "vapour transmission" OR "vapour permeability" OR "vapour transfer" OR "vapour barrier" OR "vapour absorption" OR "vapor open" OR "vapor diffusion" OR "vapor transmission" OR "vapor permeability" OR "vapor transfer" OR "vapor barrier" OR "vapor absorption" OR "moisture migration" OR "moisture transport" OR "moisture permeability" OR "permeable" OR "diffusion open" OR "diffusion-open" OR "breathable" OR "breathability" OR "hygroscopic" OR "moisture buffering" OR "mass transfer" OR "hygroscopicity") AND ("building envelope" OR "wall" OR "building assemblies" OR "building structures" OR "building component" OR "building material " OR "building materials ") AND ("bio-based " OR "organic" OR "renewable" OR "natural" OR "bio-based" OR "bio aggregate" OR "wood" OR "timber" OR "seaweed" OR "mycelium" OR "hemp insulation" OR "straw insulation" OR "cork insulation" OR "wood fibre insulation" OR "compost" OR "hemp lime" OR "cellulose " OR "hemp fibre" OR "wood fiber insulation" OR "hemp fiber")
2	condensatie - dampopen - constructie - bio-based	("condensation" OR "critical moisture level" OR "humidity" OR "moisture problems" OR "moisture infiltration" OR "water infiltration") AND ("vapour open" OR "vapour diffusion" OR "vapour transmission" OR "vapour permeability" OR "vapour transfer" OR "vapour barrier" OR "vapour absorption" OR "vapor open" OR "vapor diffusion" OR "vapor transmission" OR "vapor permeability" OR "vapor transfer" OR "vapor barrier" OR "vapor absorption" OR "moisture migration" OR "moisture transport" OR "moisture permeability" OR "permeable" OR "diffusion open" OR "diffusion-open" OR "breathable" OR "breathability" OR "hygroscopic" OR "moisture buffering" OR "mass transfer" OR "hygroscopicity") AND ("building envelope" OR "wall" OR "building assemblies" OR "building structures" OR "building component" OR "building material " OR "building materials ") AND ("bio-based " OR "organic" OR "renewable" OR "natural" OR "bio-based" OR "bio aggregate" OR "wood" OR "timber" OR "seaweed" OR "mycelium" OR "hemp insulation" OR "straw insulation" OR "cork insulation" OR "wood fibre insulation" OR "compost" OR "hemp lime" OR "cellulose " OR "hemp fibre" OR "wood fiber insulation" OR "hemp fiber")
3	dampopen - constructie - bio-based - gezondheid	("vapour open" OR "vapour diffusion" OR "vapour transmission" OR "vapour permeability" OR "vapour transfer" OR "vapour barrier" OR "vapour absorption" OR "vapor open" OR "vapor diffusion" OR "vapor transmission" OR "vapor permeability" OR "vapor transfer" OR "vapor barrier" OR "vapor absorption" OR "moisture migration" OR "moisture transport" OR "moisture permeability" OR "permeable" OR "diffusion open" OR "diffusion-open" OR "breathable" OR "breathability" OR "hygroscopic" OR "moisture buffering" OR "mass transfer" OR "hygroscopicity") AND ("building envelope" OR "wall" OR "building assemblies" OR "building structures" OR "building component" OR "building material " OR "building materials ") AND ("bio-based " OR "organic" OR "renewable" OR "natural" OR "bio-based" OR "bio aggregate" OR "wood" OR "timber" OR "seaweed" OR "mycelium" OR "hemp insulation" OR "straw insulation" OR "cork insulation" OR "wood fibre insulation" OR "compost" OR "hemp lime" OR "cellulose " OR "hemp fibre" OR "wood fiber insulation" OR "hemp fiber") AND ("health" OR "well-being" OR "symptom" OR "symptoms" OR "percent dissatisfied" OR "indoor humidity" OR "indoor climate" OR "quality of life" OR "sick building syndrome")

condensatie/ hoge RV	dampopen dampregulerend bouwen dampdiffusie open bouwen	constructie bouwen	bio-based	gezondheid/comfort	hygrothermische prestaties
Kondensatie Feuchtigheidsgehalt Feuchtigkeit Feuchtigkeitsprobleme Wassereinbruch	Dampfdiffusion Dampfdurchlässigkeit Dampfübertragung Dampfsperre Dampfoffen Dampfübertragung Feuchtigkeitstransport Diffusionsoffen Hygroskopizität	Bauhülle Gebäude Bauteil Baumaterial Wand	Biobasert Organisch Natürlich Bioaggregat Holz Meeresalgen Myzel Strohisolierung Henfisolierung Holzfaserdämmung Korkisolierung Hanfkalk Zellulose Hanffaser	Gesundheit Wohlbefinden Symptom* Luftfeuchtigkeit Raumklima Lebensqualität	Hygrothermische Leistung Hygrothermisches Verhalten Hygrothermische Materialeigenschaften Dauerhaftigkeit

1	schimmel - dampopen - constructie -bio- based	("Pilz*" OR "schimmel " OR "mehltau" OR "verrotten") AND ("Biobasert" OR "Organisch" OR "Natürlich" OR "Bioaggregat" OR "Holz" OR "Meeresalgen" OR "Myzel" OR "Strohisolierung" OR "Henfisolierung" OR "Holzfaserdämmung" OR "Korkisolierung" OR "Hanfkalk" OR "Zellulose" OR "Hanffaser") AND ("Dampfdiffusion" OR "Dampfdurchlässigkeit" OR "Dampfübertragung" OR "Dampfsperre" OR "Dampfoffen" OR "Dampfübertragung " OR "Feuchtigkeitstransport" OR "Diffusionsoffen" OR "Hygroskopizität") AND ("Bauhülle" OR "Gebäude" OR "Bauteil" OR "Baumaterial" OR "Wand")
2	condensatie - dampopen - constructie -bio- based	("Kondensatie" OR "Feuchtigheidsgehalt" OR "Feuchtigkeit" OR "Feuchtigkeitsprobleme" OR "Wassereinbruch") AND ("Dampfdiffusion" OR "Dampfdurchlässigkeit" OR "Dampfübertragung" OR "Dampfsperre" OR "Dampfoffen" OR "Dampfübertragung " OR "Feuchtigkeitstransport" OR "Diffusionsoffen" OR "Hygroskopizität") AND ("Bauhülle" OR "Gebäude" OR "Bauteil" OR "Baumaterial" OR "Wand") AND ("Biobasert" OR "Organisch" OR "Natürlich" OR "Bioaggregat" OR "Holz" OR "Meeresalgen" OR "Myzel" OR "Strohisolierung" OR "Henfisolierung" OR "Holzfaserdämmung" OR "Korkisolierung" OR "Hanfkalk" OR "Zellulose" OR "Hanffaser")
3	dampopen - constructie - bio-based - gezondheid	("Dampfdiffusion" OR "Dampfdurchlässigkeit" OR "Dampfübertragung" OR "Dampfsperre" OR "Dampfoffen" OR "Dampfübertragung " OR "Feuchtigkeitstransport" OR "Diffusionsoffen" OR "Hygroskopizität") AND ("Bauhülle" OR "Gebäude" OR "Bauteil" OR "Baumaterial" OR "Wand") AND ("Biobasert" OR "Organisch" OR "Natürlich" OR "Bioaggregat" OR "Holz" OR "Meeresalgen" OR "Myzel" OR "Strohisolierung" OR "Henfisolierung" OR "Holzfaserdämmung" OR "Korkisolierung" OR "Hanfkalk" OR "Zellulose" OR "Hanffaser") AND ("Gesundheit" OR "Wohlbefinden" OR "Symptom*" OR "Luftfeuchtigkeit" OR "Raumklima" OR "Lebensqualität")