

IWT TETRA-project 70127

**Na-Isolatie van Bestaande Spouwmuren:
*analyse van kwaliteit en geschiktheid
van materialen en uitvoeringstechnieken***

Eindrapport Werkpakket 1: Materiaalaspecten

1a: Isolatiematerialen

Arnold Janssens, Joachim Rummens, Marc Delghust
Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Universiteit Gent



Het onderzoeksproject 'Na-isolatie van bestaande spouwmuren: analyse van kwaliteit en geschiktheid van materialen en uitvoeringstechnieken' wil richtlijnen en informatie ontwikkelen die bijdragen tot de kwaliteitsvolle toepassing van na-isolatie in bestaande spouwmuren met het oog op een grootschalige thermische renovatie van woningen.

Om dit doel te realiseren is het onderzoeksproject opgedeeld in zes werkpakketten:

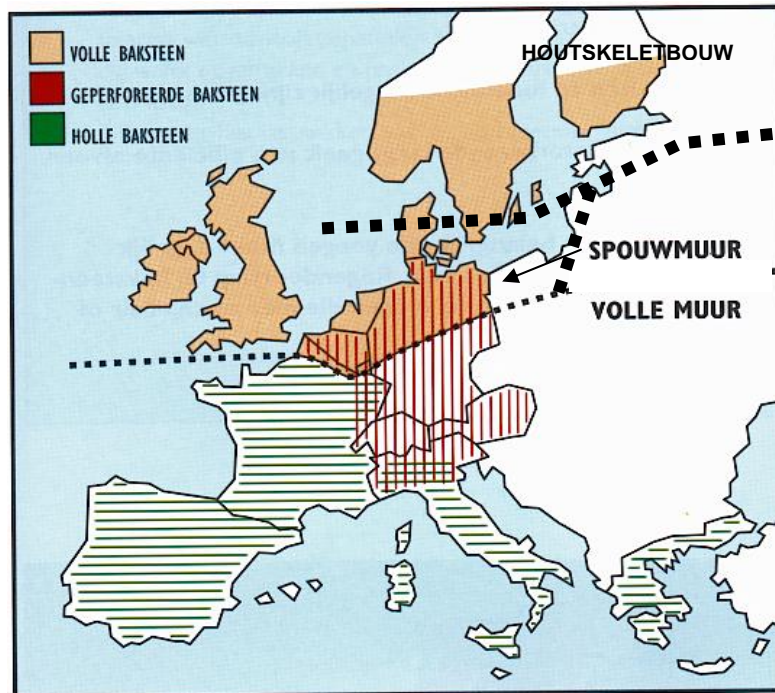
1. Materiaalaspecten: inventarisatie van materialen en materiaaleisen voor navulling, van materiaaleisen ten aanzien van het aanwezige gevelmetselwerk, en van de relatie tussen uitvoeringskwaliteit en thermische eigenschappen;
2. Uitvoeringsaspecten: analyse van bestaande methodes en procedures van voorstudie, uitvoering en nazorg, en van de kritische stappen in het proces.
3. Kwaliteitsbewaking: analyse van bestaande processen van kwaliteitsbewaking en certificatie, en ontwikkeling van een goedkeuringsleidraad.
4. Evaluatie na-isolatieprojecten: analyse en documentatie van oude en nieuwe na-isolatieprojecten in Vlaanderen, en beoordeling risico's op vochtproblemen bij koudebruggen.
5. Energierenovatieplan: inventarisatie van kenmerken van het bestaande woningenpark, objectieve evaluatie van het energiebesparingpotentieel en van de aanpak bij energieadvies en -certificatie.
6. Technologieverspreiding: ontwikkelen van verbeterde technische richtlijnen voor uitvoering, van een kader voor kwaliteitsbewaking en van objectieve informatie over kwaliteitsvolle toepassing van naisolatie (via kanalen BUtgb, WTCB,...)

Het project werd mogelijk door de steun van volgende bedrijven en organisaties: Comforthouse NV, IsoproC cvba, Isotrie nv, Noten nv, Pluimers isolatie bvba, Sani-detectif bvba, Serck NV, Thiers-Horizon nv, Belgian Construction Certification Association vzw, Knaufinsulation sa, Rockwool Belgium nv, Styfabel vzw, en de Vlaamse Maatschappij voor Sociaal Wonen. De onderzoekers zijn hen hiervoor zeer erkentelijk.

Inleiding

De spouwmuur is een traditionele geveloplossing in streken met veel slagregen (België, Denemarken, Nederland, Verenigd Koninkrijk). Het regendoorslagprobleem wordt opgelost door opsplitsing van een wand in twee metselwerkklagen gescheiden door een 5 à 6 cm brede spouw, en voorzien van drainagemogelijkheden. De traditionele spouwmuur met luchtsouw is op het vlak van thermische isolatie echter weinig performant en beantwoordt niet meer aan de maatschappelijke noden met betrekking tot de energieprestatie van gebouwen.

Het navullen van de luchtsouw met thermische isolatie is een voor de hand liggende en relatief eenvoudige techniek die toelaat de warmteverliezen door een spouwmuur te reduceren. Hiervoor komen verschillende materialen in aanmerking op voorwaarde dat ze geschikte thermische, hygrische en mechanische eigenschappen hebben. In wat volgt worden de eigenschappen van de beschikbare materialen voor na-isolatie van spouwmuren besproken en geëvalueerd.



(Bron figuur: Handboek snelbouwbaksteen, VZW Bouwen met baksteen)

Onderzochte isolatiematerialen

Voor navulling van spouwmuren zijn er enerzijds kunststoffen op de markt, waaronder polyurethaan (PUR-)schuim, ureumformaldehyde (UF-)schuim, en geëxpandeerde polystyreenparels (EPS). Anderzijds zijn er anorganische isolatiematerialen beschikbaar, zoals minerale wol (rots- en glaswolvlakken), gesiliciseerde perliet- (EP) en vermiculietkorrels (EV), en silicaatschuimkorrels (SLS). De verwerking van de producten op de werf gebeurt met gespecialiseerde inblaasapparatuur. PUR- en UF-schuim worden ingespoten in vloeibare vorm en ontwikkelen zich in de spouw tot een vast kunststofschuim. De vezel- en korrelvormige producten worden meestal onder druk ingebracht, soms samen met een bindmiddel (bij EPS), en zo verdeeld over de spouw.

Voor de isolatieproducten voor na-isolatie werden in buitenlandse richtlijnen en normen producteisen en testmethodes vastgelegd. Recent werden ook nieuwe Europese normen ontwikkeld voor dit type producten (CEN TC 88: In-situ Thermal Insulation products for buildings). Dit rapport geeft een overzicht van de beschikbare informatie en relevante eisen voor na-isolatiematerialen. Deze worden geconfronteerd met meetresultaten van productmonsters verzameld bij de deelnemende bedrijven in het project.

Van de beschikbare materialen voor na-isolatie van bestaande spouwmuren werden op twee manieren monsters verzameld:

- Verzameling van grondstoffen in bulk: EPS, rotswol, glaswol, perliet, vermiculiet en silicaatschuimkorrels (Figuur 1)
- Verzameling van het verwerkte materiaal in een via de inblaasapparatuur gevulde 'testbox' van 60x60x6 cm³ opgebouwd uit multiplex en met één zijde in plexiglas zodat het vulproces kon geobserveerd worden. Vergelijkbare methodes zijn voorgesteld in de pre-Europese normen (prEN 14064-1, prEN 14318-1 en prEN15100-1) Het op deze manier verzamelde materiaal zou representatief moeten zijn voor het in de spouw gevormde materiaal. Deze methode werd toegepast voor volgende materialen: PUR-schuim, UF-schuim, EPS-parels (white beads), rotswol, en silicaatschuimkorrels. Van elk materiaal werden twee boxen gevuld. Eén box werd gebruikt om monsters aan te maken voor materiaalmetingen. De tweede box werd rechtopstaand in het labo bewaard om het gedrag van de materialen op langere termijn te observeren (krimp, zetting,...) (Figuur 2).



Figuur 1: Verzamelde grondstoffen voor na-isolatie
Bovenste rij: rotswol, glaswol, EPS-parels (silver beads)
Onderste rij: perlietkorrels, silicaatschuimkorrels, vermiculiet



Fig. 2a: Testbox 60x60x6 cm³ voor vulling



Fig. 2b: Testbox met PUR, 1 jaar na vulling



Fig. 2c: Testbox met UF, 1 jaar na vulling



Fig. 2d: Testbox met EPS-w, 1 jaar na vulling

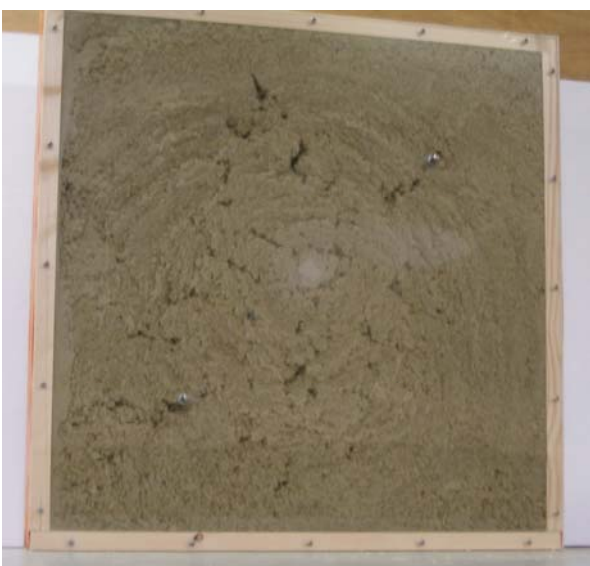


Fig. 2e: Testbox met rotswol, 1 jaar na vulling



Fig. 2f: Testbox met SLS, 1 jaar na vulling

Metingen warmtegeleidingscoëfficiënt

In wat volgt worden resultaten van de gemeten thermische eigenschappen gerapporteerd van de isolatiematerialen voor na-isolatie van spouwmuren. Dit gebeurt op basis van metingen op twee monsters per materiaalsoort. Het is de bedoeling om met deze resultaten de beschikbare data van bedrijven en uit de literatuur te toetsen, en om de voornaamste invloedsparameters op de thermische eigenschappen te bespreken. Het lag buiten het bestek van dit onderzoek om uitgebreide materiaalmetingen uit te voeren om statistisch significante rekenwaarden af te leiden. Tabel 1 geeft een overzicht van kenmerkende thermische eigenschappen van de isolatiematerialen, zoals gedocumenteerd door bedrijven en in de literatuur. Verschillende nationale en Europese normen bevatten verder gegevens over de thermische eigenschappen van isolatiematerialen. Omdat het niet altijd duidelijk is of deze gegevens ook van toepassing zijn op na-isolatieproducten zijn in onderstaande tabel enkel data weergegeven die duidelijk betrekking hebben op na-isolatiematerialen.

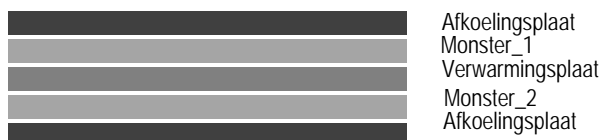
Tabel 1: Kenmerkende waarden van de warmtegeleidingscoëfficiënt (W/mK)

Na-isolatiemateriaal	Productinformatie bedrijven	R&D Energie 1984	TNO-studie Metingen in labo
UF		0.050	0.050
PUR	0.030-0.035	0.040	0.044
EPS	0.037-0.042	0.045	0.044
Rotswol	0.045	0.045	0.047
Glaswol	0.045	0.045	0.045
EP	0.045-0.050	0.045-0.060	
EV	0.070		
SLS	0.035-0.040		

Testmethode

De warmtegeleidingscoëfficiënt λ [W/mK] wordt in het kader van dit onderzoek bepaald volgens de methode beschreven in de Belgische norm NBN B62-201: 'Bepaling in droge toestand van de thermische geleidbaarheid of thermische permeantie van de bouwmaterialen door de methode van de verwarmingsplaat met schutting'. Deze norm geldt voor materialen die zich homogeen gedragen ten opzichte van een éénrichtingsstroom en waarvan de warmtegeleidingscoëfficiënt kleiner is dan of gelijk aan 1,2 W/mK en is slechts geldig voor droge materialen. Omdat de testmethode volledig droge materialen eist, worden de monsters voor aanvang van de meting uitgedroogd in een klimaatkast bij een temperatuur van 60°C. Daarna wordt de meting uitgevoerd en de λ -waarde bepaald.

De methode bestaat erin de warmtestroom te bepalen die, in permanent regime, doorheen twee monsters van eenzelfde dikte gaat, die tussen twee gekoelde platen zijn geplaatst en van elkaar gescheiden door een verwarmde plaat, voorzien van een schutting (Figuur 3).



Figuur 3: Proefopstelling



Figuur 4: Voorbereiding monsters

Voor elk van de na-isolatieproducten werden 2 monsters aangemaakt met afmetingen 30x30x2 cm. Van de kunststofschuimen UF en PUR werden rechtstreeks monsters gesneden uit de in de testbox aangemaakte stalen. Om te vermijden dat het materiaal tijdens de test zou worden ingedrukt werd het omkaderd met behulp van balsahout, en uitgevlakt met behulp van een polijststeen. Voor analyse van de vezel- en korrelvormige producten werd eveneens gebruik gemaakt van een dun kader in balsahout, dat gevuld werd met het product volgens de door fabrikant of norm vereiste densiteit (Figuur 4).

Warmtegeleidingscoëfficiënt van droge materialen

Tabel 2 en Figuur 5 tonen de resultaten van de metingen. Het valt op dat de thermische eigenschappen van alle isolatieproducten voor navulling in dezelfde grootte-orde vallen ≈ 0.039 W/mK ± 0.002 W/mK. De enige uitzonderingen zijn perliet- (0.044 W/mK) en vermiculietkorrels (0.069 W/mK), waarbij zeker de laatste een aanzienlijk hogere warmtegeleidingscoëfficiënt heeft. Deze laatste bevinding wordt gestaafd door typische waarden uit de literatuur (Tabel 1).

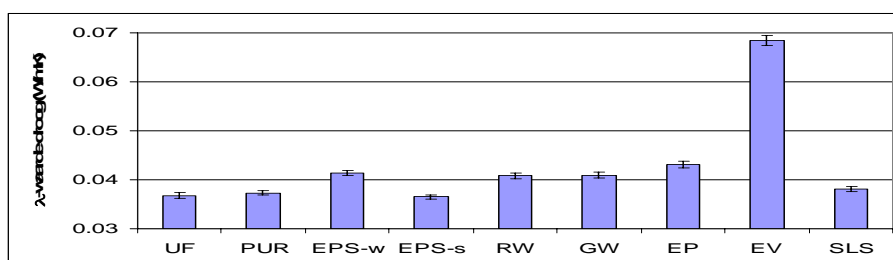
Zoals bij alle isolatietechnieken is de uitvoeringskwaliteit van de isolatie bepalend voor de uiteindelijke (thermische) prestaties. Dit geldt zeker voor navulling aangezien er tijdens de werken maar een beperkte visuele controle mogelijk is. De uitvoering zal vooral de densiteit van het in de spouw ingebrachte materiaal bepalen. Voor twee productgroepen leggen de Europese pre-normen eisen op aan de minimaal te realiseren densiteit, nl. voor UF-schuim en minerale wol (zie Tabel). Deze eisen hebben o.a. tot doel om de volumevermindering ten gevolge van krimp of zakking te vermijden.

Voor de minerale wollen is de invloed van de volumemassa van het product nagegaan. De thermische eigenschappen verbeteren duidelijk naarmate een hogere volumemassa wordt toegepast. De figuur geeft voor rots- en glaswol telkens de gemeten warmtegeleidingscoëfficiënt weer bij een densiteit die net voldoet aan de in de Europese pre-normen vereiste waarde. Zoals uit de tabel blijkt komt deze echter niet noodzakelijk overeen met de minimaal haalbare warmtegeleidingscoëfficiënt.

Tabel 2: Meetresultaten warmtegeleidingscoëfficiënt van droge materialen

Materiaal	gemiddelde volumemassa (kg/m ³)	vereiste volumemassa	λ^* (W/mK)	Meetnauwkeurigheid
UF	8	≥ 6 kg/m ³ , prEN 15100-1	0.037	1.5%
PUR	26	-	0.038	1.2%
EPS-w (White beads)	14	-	0.042	1.2%
EPS-s (Silver beads)	12	-	0.037	1.2%
Rotswol	40	≥ 60 kg/m ³ , prEN 14064-1	0.045	1.5%
	70		0.041	1.5%
Glaswol scrap wool (geel)	30	≥ 25 kg/m ³ , prEN 14064-1	0.041	1.5%
	50		0.038	1.5%
Glaswol virgin wool (wit)	30	≥ 25 kg/m ³ , prEN 14064-1	0.039	1.5%
	40		0.036	1.5%
Perlietkorrels (EP)	80	-	0.044	1.5%
Vermiculietkorrels (EV)	104	-	0.069	1.5%
SLS	24	-	0.039	1.5%

* gemiddelde waarde van twee monsters, afgerond naar de bovenste 0.001 W/mK



Figuur 5: Gemiddelde warmtegeleidingscoëfficiënt droge materialen

Van droge naar gedeclareerde warmtegeleidingscoëfficiënt

De meetresultaten liggen over het algemeen wat lager dan gedeclareerde rekenwaarden die in productdocumentatie en in literatuur worden weergegeven (zie Tabel 1). De verklaring hiervoor is het feit dat in de rekenwaarden verschillende gebruiksfactoren worden in rekening gebracht, namelijk (ISO 10456):

- Fysische gebruiksomstandigheden (vocht, temperatuur)
- Veroudering
- Statistische invloeden

Vochtinvloed

De fysische gebruiksomstandigheden van materialen voor na-isolatie komen volgens de Europese pre-normen overeen met een gemiddelde temperatuur van 10°C, en een gemiddelde relatieve vochtigheid van 50%. Om deze reden wordt de λ -waarde bij voorkeur bepaald op monsters die geconditioneerd werden bij 50% relatieve vochtigheid. De warmtegeleidingscoëfficiënt bepaald bij een bepaald vochtgehalte kan echter omgerekend worden naar een waarde bij een ander vochtgehalte, door gebruik te maken van volgende omrekeningsfactor (ISO 10456):

$$\lambda_2 = \lambda_1 F_m$$

met:

$$F_m = e^{f_u(u_2 - u_1)}$$

of:

$$F_m = e^{f_\psi(\psi_2 - \psi_1)}$$

met F_m een correctiefactor voor de vochtinvloed, u (kg/kg) en ψ (m³/m³) het vochtgehalte uitgedrukt als massa- resp. volumeverhouding, en f_u en f_ψ vochtconversiefactoren voor massa- resp. volumeverhouding.

Om de gemeten warmtegeleidingscoëfficiënt van een droog materiaal om te rekenen naar die van een vochtig materiaal, bepaalden we van enkele materialen het hygroscopisch vochtgehalte in evenwicht met 50% relatieve vochtigheid. Dit gebeurde door UF, PUR, rotswol en glaswol voor telkens 8 monsters geconditioneerd in een klimaatkamer aan 50% relatieve vochtigheid. Voor de andere materialen werden, indien beschikbaar, getabelleerde vochtgehalten uit ISO 10456 gebruikt. De combinatie van de hygroscopische vochtgehalten met de vochtconversiefactoren uit ISO 10456 geeft per materiaal de correctiefactor voor vochtinvloeden. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 3. Hieruit blijkt dat de vochtinvloed zorgt voor een toename van de warmtegeleidingscoëfficiënt met maximaal 3%.

Tabel 3: Bepaling van correctiefactor F_m voor correctie λ -waarde droge materialen

Materiaal	ψ_{50}^* (m ³ /m ³)	u_{50} (kg/kg)	f_ψ	f_u	F_m
UF	0.003		7		1.021
PUR	0.003		3		1.009
EPS	-		4		-
MW (rots- en glaswol)	0.001		4		1.004
EP		0.01		3	1.030
EV		0.01		2	1.020
SLS	Geen gegevens				

*Gemiddelde van 8 eigen meetwaarden; overige gegevens behalve ψ_{50} uit ISO 10456

Veroudering

De thermische eigenschappen van sommige isolatiematerialen veranderen bij veroudering. De toe te passen rekenwaarde van de warmtegeleidingscoëfficiënt moet representatief zijn voor de typische levensduur van isolatiematerialen, standaard vastgelegd op 50 jaar (ISO 10456). Dit gebeurt via een correctiefactor voor veroudering.

De Europese pre-normen voor isolatiematerialen voor navulling leggen voor twee materialen methodes vast om veroudering in rekening te brengen:

- UF-schuim verouderd door het krimpen van het isolatiemateriaal. Krimp treedt op wanneer het bij inblazen vochtige schuim na verloop van tijd droogt en de dikte van het isolatiemateriaal vermindert. De diktevermindering wordt omgerekend naar een equivalente λ -waarde die van toepassing is op de oorspronkelijke spouwbreedte (prEN 15100-1):

$$\lambda_a = \lambda_h \frac{D_i}{D_h}$$

met λ_a de equivalente λ -waarde na veroudering (ageing), λ_h de gemeten λ -waarde van het gedroogde materiaal (heat treatment), D_i de initiële dikte van het monster en D_h de dikte van het gedroogde en gekrompen monster.

- PUR-schuim verouderd door de geleidelijke diffusie van het drijfgas uit het materiaal, waarbij het drijfgas vervangen wordt door lucht. Tijdens dit proces neemt de warmtegeleidingscoëfficiënt van het schuim langzaam toe. De toename van de λ -waarde hangt van verschillende factoren af: het drijfgas (CFK's, HCFK's, CO₂), het gehalte aan gesloten cellen en de diffusieweerstand van het materiaal. PrEN 14318-1 beschrijft verschillende methodes voor versnelde veroudering, in combinatie met veiligheidsmarges $\Delta\lambda$. De methodes voor versnelde veroudering steunen op de conditionering van materiaalmonsters bij temperaturen van 70°C. De methodes en richtwaardes zijn echter vooral uitgewerkt voor CFK- en HCFK-houdende PUR-schuimen met een gehalte aan gesloten cellen van 90% of meer. De watergeblazen schuimen voor na-isolatie van spouwmuren in dit onderzoek zijn echter HCFK-vrij en het injectieproces levert een schuim op met een groot gehalte aan open cellen. Dit wordt bevestigd door de meting van het diffusieweerstandsgetal (zie verder). Deze schuimen zijn hierdoor minder gevoelig voor veroudering. Aangezien bij de bepaling van de λ -waarde het materiaal bovendien verhit werd in de droogstoof (vergelijkbaar met de methodes voor versnelde veroudering), kunnen we er van uit gaan dat de gemeten waarde representatief is voor het verouderde product. Dit werd bevestigd door een aanvullende meting op dezelfde proefstukken na 2 jaar bewaring: de nieuwe meting leverde hetzelfde resultaat op.

De optredende krimp in het UF-schuim werd op twee manieren bepaald:

- Zoals voorgeschreven in prEN 15100-1: door 8 monsters te nemen uit het in de testbox verzamelde materiaal, te drogen in een droogstoof bij 60°C en de diktevermindering te meten. Volgens deze methode werd een relatieve diktevermindering $(D_i - D_h)/D_i$ van gemiddeld 10.0% gemeten (gemeten volumekrimp 25.1 %).
- Door één van beide testboxen verticaal te bewaren bij kamertemperatuur en één jaar na de monsternamen de diktevermindering te meten (Figuur 2c). In dit geval bedroeg de relatieve diktevermindering eveneens 10.0%. Enkel bij de testbox gevuld met UF-schuim werd krimp vastgesteld (Figuren 2b-2f).
- Ten gevolge van de diktevermindering van het schuim is de equivalente λ -waarde na veroudering λ_a 11% groter dan de gemeten waarde van het droge schuim λ_h

Statistische invloeden

De gedeclareerde waarde van de warmtegeleidingscoëfficiënt van een isolatieproduct moet door de fabrikant worden berekend uit een steekproef met minimaal 10 metingen, genomen over een productieperiode van een jaar (prEN 14064-1). Bij de bepaling van de gedeclareerde waarde wordt rekening gehouden met de statistische variatie van de gemeten λ -waarde in de steekproef. De gedeclareerde waarde komt overeen met het 90%-percentiel met een betrouwbaarheid van 90%, berekend volgens onderstaande statistische relatie:

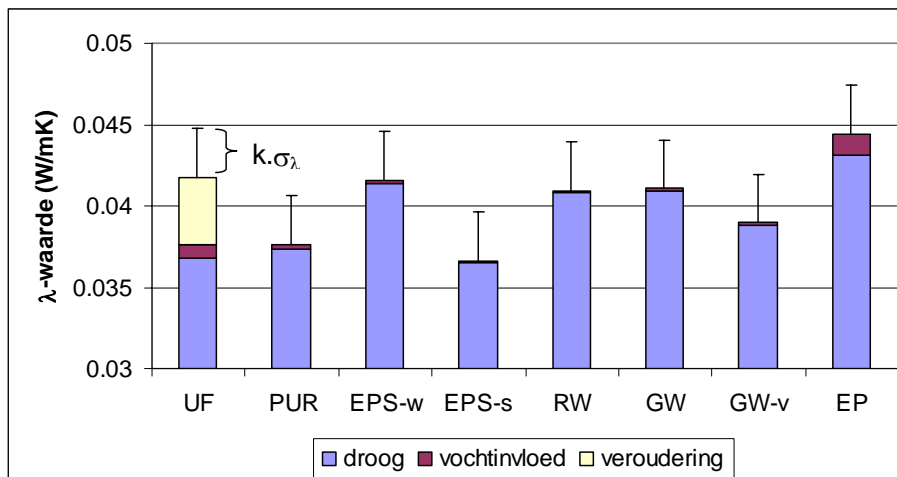
$$\lambda_{90/90} = \lambda_m + k\sigma_\lambda$$

met λ_m de gemiddelde λ -waarde in de steekproef, σ_λ de standaarddeviatie, en k een vermenigvuldigingsfactor die functie is van het aantal testresultaten, gaande van $k = 2.07$ voor 10 testresultaten over 1.47 voor 100 testresultaten tot 1.282 voor ∞ testresultaten (zie pre-normen).

De samenstelling van isolatiematerialen voor na-isolatie is door de aard van het proces minder beheersbaar dan die van industrieel vervaardigde isolatiematerialen. Hierdoor kan de gedeclareerde λ -waarde enkele milliwatts verschillen van de gemiddeld gemeten waarde.

Thermische prestatie van na-geïsoleerde spouwmuren

De drie voornoemde invloeden moeten per materiaal gesommeerd worden om de gedeclareerde warmtegeleidingscoëfficiënt te bepalen. Figuur 6 geeft een beeld van de verschillende invloeden, uitgaande van de gemeten waarden voor droge materiaalmonsters. Bij de bepaling van de statistische invloed werd verondersteld dat er geen noemenswaardige verschillen zijn in de variatie van thermische eigenschappen per materiaal ($k \cdot \sigma_\lambda = 0.003 \text{ W/mK}$). De resultaten van deze analyse bevestigen dat de thermische eigenschappen van de belangrijkste materialen voor na-isolatie gelijkaardig zijn. De rekenwaarden bedragen in grootte-orde 0.040 W/mK voor PUR-schuim en EPS-parels (silver beads), en 0.045 W/mK voor UF-schuim, EPS-parels (white beads), rotswol en glaswol. De grijze EPS-parels halen een betere λ -waarde dan de witte omdat de laag-emissieve coating (grijze kleur) de stralingsoverdracht in de poriën vermindert. De witte glaswol variant (virgin wool) scoort bij eenzelfde volumemassa iets beter dan de gele soort (scrap wool).



Figuur 6: Inschatting van rekenwaarden voor de warmtegeleidingscoëfficiënt

Nu de rekenwaarden voor de warmtegeleidingscoëfficiënt van na-isolatiematerialen geraamd zijn stelt zich de vraag in welke mate na-isolatie de thermische prestatie van spouwmuren verbetert. We illustreren dit aan de hand van een traditionele spouwmuur met 5 à 6 cm spouw tussen binnen- en buitenspouwblad. De kenmerken van de verschillende lagen zijn weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4: Opbouw van traditionele spouwmuur

Laag	Dikte (m)	Volumemassa (kg/m ³)	λ (W/mK)	Voegfractie (%)
Gevelmetselwerk	0.09	1700	1.19	28
Spouw	0.05/0.06			
Binnenspouwblad	0.14			16
– Zwaar		2100	0.81	
– Halfzwaar		1200	0.39	
– Licht		700	0.22	
Pleister	0.02	1300	0.52	

De U-waarde van de ongeïsoleerde spouwmuur wordt berekend in functie van twee parameters:

- De volumemassa (en λ -waarde) van het metselwerk van het binnenspouwblad, met varianten zwaar, halfzwaar en licht.
- De mate van ventilatie van de luchtspouw, met varianten sterk geventileerd, matig geventileerd en niet geventileerd.

De U-waarde van de geïsoleerde spouwmuur wordt eveneens berekend in functie van de volumemassa van het metselwerk. Een bijkomende parameter is:

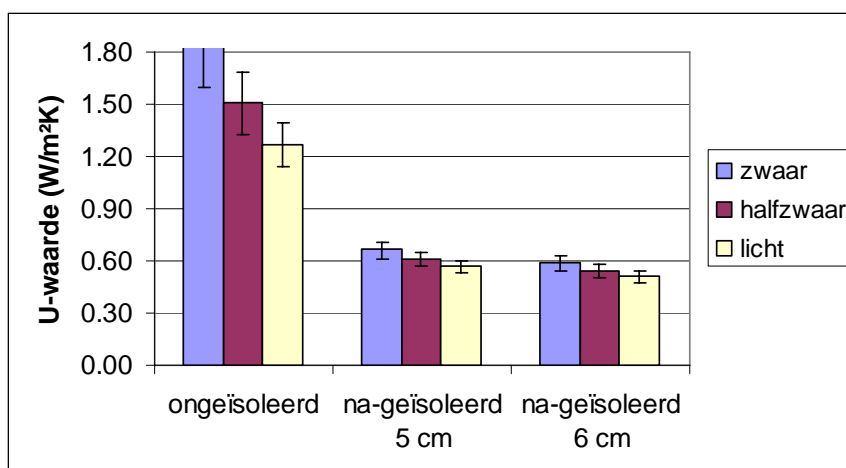
- De warmtegeleidingscoëfficiënt van het na-isolatiemateriaal, met varianten 0.050 , 0.045 en 0.040 W/mK .

Tabel 5 en Figuur 7 tonen de resultaten van de berekening. Deze is uitgevoerd conform de richtlijnen van het transmissiereferentiedocument en houdt rekening met de invloeden van mortelvoegen en spouwankers, uitgaande van waarden bij ontstentenis. De grafiek toont de berekende U-waarde van ongeïsoleerde spouwmuren met een matig geventileerde spouw en van na-geïsoleerde spouwmuren met isolatie met een λ -waarde van 0.045 W/mK. De foutbalken in de grafiek illustreren de invloed van spouwventilatie voor de ongeïsoleerde spouwmuur en de invloed van een variatie in λ -waarde met 0.005 W/mK voor de na-geïsoleerde spouwmuur.

Door het na-isoleren van de spouwmuur kan de warmtedoorgangscoefficiënt met een factor 2 à 3 afnemen, afhankelijk van de opbouw van de oorspronkelijke muur en de gerealiseerde warmteweerstand van de na-isolatie. De gerealiseerde U-waarde van de na-geïsoleerde spouwmuur situeert zich tussen 0.48 en 0.71 W/m²K. De waarde blijkt even gevoelig aan de spouwbreedte en aan de eigenschappen van het binnenspouwblad als aan de thermische eigenschappen van het na-isolatiemateriaal.

Tabel 5: berekende U-waarde (overeenkomstig TRD)

		zwaar	Halfzwaar	Licht
Ongeïsoleerd	Sterk geventileerde spouw	2.14	1.69	1.39
	Matig geventileerde spouw	1.86	1.51	1.27
	Niet-geventileerde spouw	1.59	1.33	1.14
Na-geïsoleerd 5 cm	$\lambda = 0.050$ W/mK	0.71	0.65	0.60
	$\lambda = 0.045$ W/mK	0.66	0.61	0.57
	$\lambda = 0.040$ W/mK	0.61	0.57	0.53
Na-geïsoleerd 6 cm	$\lambda = 0.050$ W/mK	0.63	0.58	0.54
	$\lambda = 0.045$ W/mK	0.59	0.55	0.51
	$\lambda = 0.040$ W/mK	0.54	0.51	0.48



Figuur 7: Berekende U-waarde (overeenkomstig TRD) voor een ongeïsoleerde en na-geïsoleerde traditionele spouwmuur met 5 en 6 cm spouwbreedte.

Belang van een voldoende hoge volumemassa

De volumemassa is een bepalende factor voor de fysische eigenschappen van de isolatiematerialen voor navulling. Een controle van de gerealiseerde volumemassa in situ vormt daarom een belangrijk element in de kwaliteitscontrole van het na-isolatieproces. Bij vezel- en korrelvormige na-isolatieproducten laat een meting van de spouwbreedte, het geveloppervlak en de ingebrachte massa isolatieproduct toe de gerealiseerde volumemassa bij een na-isolatieproject eenvoudig te controleren. De volumemassa moet hoger zijn dan een kritische ondergrens om drie redenen:

1. Een voldoende hoge volumemassa is nodig om de volumevermindering ten gevolge van krimp of zakking te vermijden, en een volledige vulling van de spouw te waarborgen. Deze eis legt een ondergrens vast waarvoor in een aantal Europese pre-normen een waarde wordt voorgesteld (zie Tabel 2).
2. De minimale volumemassa nodig om een volumevermindering te vermijden is niet noodzakelijk de volumemassa waarbij de warmtegeleidingscoëfficiënt optimaal is. De fabrikant kan de aan

te houden volumemassa vastleggen om ervoor te zorgen dat het product een optimale thermische prestatie levert. Deze 'optimale' volumemassa kan verschillen van de ondergrens voorgesteld in de Europese pre-normen.

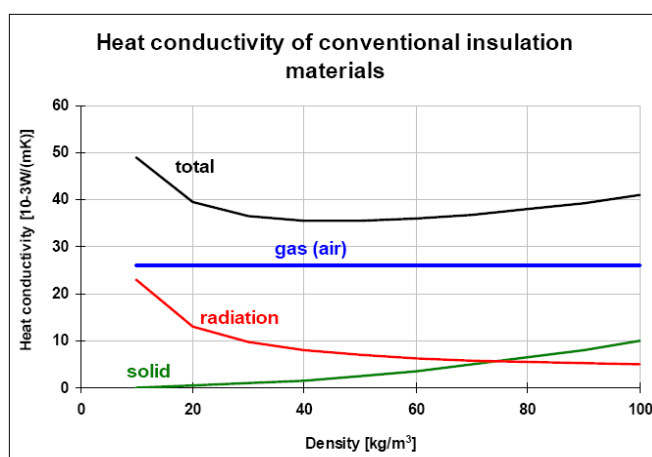
3. Tenslotte moet een voldoende hoge volumemassa van de vezel- en korrelvormige isolatiematerialen zorgen voor een beperkte luchtdoorlatendheid (permeabiliteit) van het poreuze isolatieproduct. Bij een te licht en daardoor luchtdoorlatend materiaal kan macroscopische luchtstroming optreden doorheen de poriën van het materiaal (natuurlijke convectie). In dit geval is het werkelijk warmteverlies groter dan wat de warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal aangeeft. Een vergelijkbaar probleem stelt zich bij materialen die krimp vertonen (zoals UF). Hier kan luchtstroming optreden doorheen de krimpscheuren rondom en doorheen het isolatiemateriaal.

Invloed van volumemassa op λ -waarde

Het warmtetransport in poreuze isolatiematerialen wordt beïnvloed door de processen van warmtetransport in de poriënstructuur (Figuur 8):

1. Geleiding in de met gas gevulde poriën (doorgaans lucht) domineert het warmtetransport;
2. Geleiding in de vaste matrix neemt in belang toe naarmate de volumemassa en dus het aandeel van de vaste matrix toeneemt;
3. Langgolvige straling tussen de poriënwallen neemt in belang toe naarmate de volumemassa afneemt. Bij een kleine volumemassa nemen de afmetingen van de poriën toe en is er een kleiner aantal poriënwallen dat de straling tussen de warme en koude zijde van het isolatiemateriaal belemmert;
4. Eventueel geleiding via het poriënwater, indien het materiaal vochtig is.

De verschillen in thermische eigenschappen van na-isolatiematerialen zijn dus hoofdzakelijk toe te schrijven aan de samenstelling van de vaste matrix (kunststoffen versus anorganische materialen) en aan het optreden van straling in de poriën (verschillen in volumemassa, grondstoffen met laag-emissieve coating).



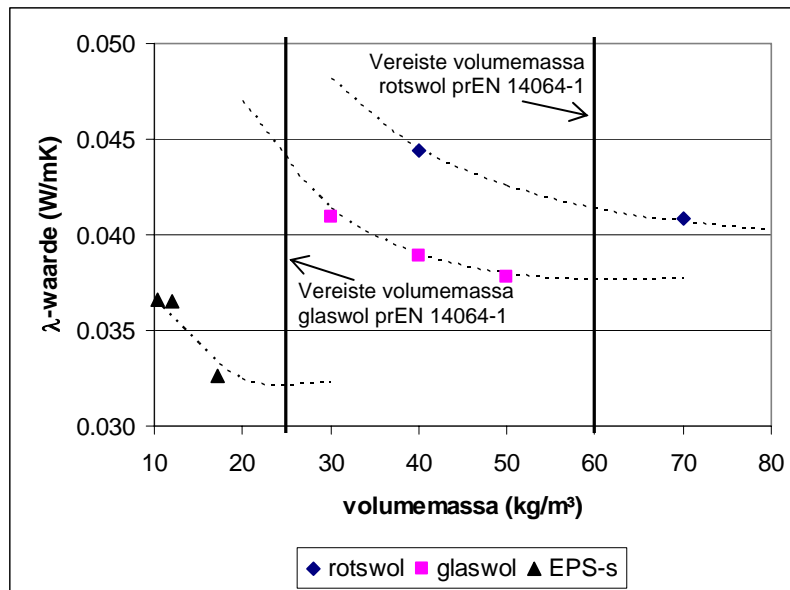
Figuur 8: Fysische relatie tussen warmtegeleidingscoëfficiënt en volumemassa van isolatiematerialen (IEA-Annex 39)

De tegengestelde invloed van proces 2 en 3 zorgt ervoor dat de λ -waarde varieert in functie van de volumemassa van het materiaal en een optimale waarde bereikt binnen een bepaald volumemassa-interval. Dit verband kan met volgende functie beschreven worden:

$$\lambda(\rho) = a + b\rho + c/\rho$$

Figuur 9 toont deze relatie voor enkele van de bestudeerde na-isolatiematerialen. De gevonden relatie wordt voor rotswol en glaswol vergeleken met de minimaal vereiste volumemassa in prEN 14064-1 (resp. 60 en 25 kg/m³). Het is duidelijk dat de thermische eigenschappen bij de minimaal vereiste volumemassa minder goed zijn dan die bij een grotere volumemassa. Het is dus zinvol om deze materialen zo te doseren dat de gerealiseerde volumemassa de minimaal vereiste waarde ruim overschrijdt. De Nederlandse uitvoeringsrichtlijn voor minerale wol vermeldt bijvoorbeeld een minimale waarde van 40 kg/m³ als aan te houden volumemassa voor glaswol in plaats van de 25

kg/m³ die de pre-norm aanbeveelt. De fabrikant moet desgevallend een minimum volumemassa ρ_{mini} opgeven die overeenkomt met de gedeclareerde warmtegeleidingscoëfficiënt van het product.



Figuur 9: Meetresultaten (droge λ -waarde) van thermische eigenschappen in functie van volumemassa

Invloed van luchtstroming in poreuze materialen

Bij de losse navulmaterialen ontstaat er bij een te lage dichtheid luchtrotatie in het materiaal door natuurlijk convectie. Dit leidt tot een toename van de warmteverliezen. Het optreden van natuurlijke convectie in poreuze materialen hangt af van vier factoren (ISO/DIS 10456):

- De doorlatendheid van het materiaal k (m²)
- De warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal λ (W/mK)
- Het temperatuurverschil over de isolatielaag ΔT (K)
- De dikte van de isolatielaag d (m)

De drijvende kracht voor natuurlijke convectie wordt beschreven met behulp van het dimensieloze Rayleigh-getal, dat de invloed van de vier voornoemde factoren weergeeft in één cijfer:

$$Ra_m = 3 \cdot 10^6 d \cdot k \cdot \Delta T / \lambda$$

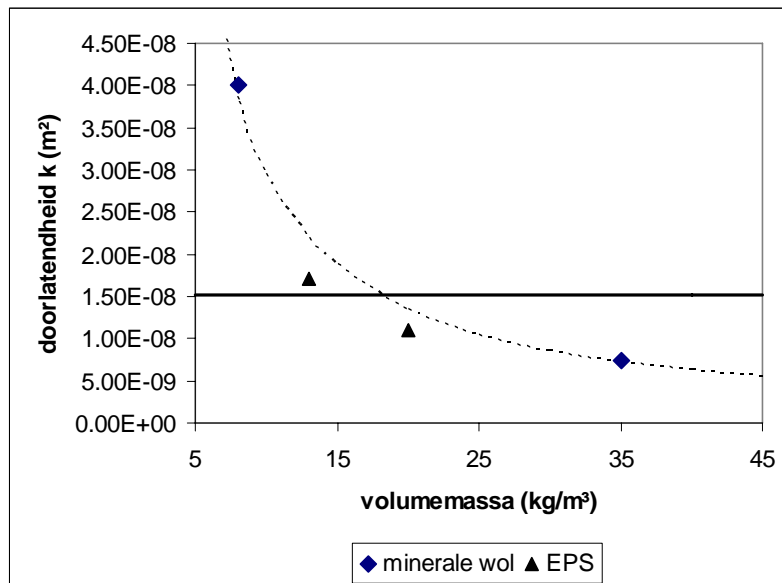
Zolang het Rayleigh-getal de kritische waarde van 1.5 niet overschrijdt, kan de invloed van natuurlijke convectie op het warmteverlies doorheen een verticale isolatielaag verwaarloosd worden (ISO/DIS 10456). Dit kritisch Rayleigh-getal kan omgerekend worden naar een kritische waarde van de doorlatendheid k , uitgaande van een standaard spouwbreedte van 6 cm, een warmtegeleidingscoëfficiënt van 0.04 W/mK en een temperatuurverschil van 22°C over de isolatielaag. Deze laatste waarde komt overeen met het temperatuurverschil dat optreedt over de isolatie van een geïsoleerde spouwmuur wanneer het temperatuurverschil tussen binnen en buiten 30°C bedraagt, tijdens een zeer koude winterdag. De doorlatendheid van het isolatiemateriaal moet kleiner zijn dan $1.52 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ om te vermijden dat het Rayleigh-getal de kritische waarde van 1.5 in deze omstandigheden overschrijdt.

We evalueren deze grenswaarde op basis van (een beperkt aantal) in de literatuur gerapporteerde waarden van de luchtdoorlatendheid van losse isolatiematerialen. Figuur 10 illustreert de relatie tussen volumemassa en doorlatendheid voor minerale wolvlokken en EPS-parels. Voor minerale wolvlokken kan volgend verband afgeleid worden:

$$k = 4 \cdot 10^{-7} \rho^{-1.13} [\text{m}^2]$$

Wanneer de gerapporteerde waarden worden vergeleken met de kritische grenswaarden blijkt dat het optreden van natuurlijke convectie enkel mogelijk is bij zeer lage volumemassa's. Voor minerale wol volstaat een volumemassa groter dan 18 kg/m³ om het effect van convectie uit te

sluiten. Voor EPS moet de volumemassa groter zijn dan $\pm 13 \text{ kg/m}^3$ om convectie in alle omstandigheden uit te sluiten. Deze waarde is echter afgeleid uit metingen op ongebonden EPS-korrels. Voor gebonden EPS-korrels is de doorlatendheid bij eenzelfde volumemassa allicht kleiner. Uit de resultaten voor EPS en minerale wol blijkt dus dat de invloed van natuurlijke convectie bij een correcte dosering van het materiaal in de spouw kan verwaarloosd worden.



Figuur 10: Vergelijking van gerapporteerde waarden van de doorlatendheid van na-isolatiematerialen (Kronvall 1980, Serkitjys 1995) met de kritische grenswaarde die niet mag overschreden worden om convectie uit te sluiten.

Invloed van luchtstroming in krimpscheuren

Wanneer een in de spouw gevormd kunststofschuim krimpt, ontstaan er in het materiaal en tussen het gekrompen schuim en metselwerk scheuren met een onregelmatig patroon. Bij vorming van luchtlaagjes aan beide zijden van het isolatieschuim kan de lucht via deze luchtlaagjes en de krimpscheuren die beide luchtlaagjes met elkaar verbinden gaan roteren. Dit convectieproces leidt tot een toename van de warmteverliezen zoals bij convectie in poreuze isolatiematerialen. Het optreden van natuurlijke convectie hangt echter sterk af van het scheurpatroon dat ontstaat en het al dan niet voorkomen van luchtlagen aan beide zijden van het schuim.

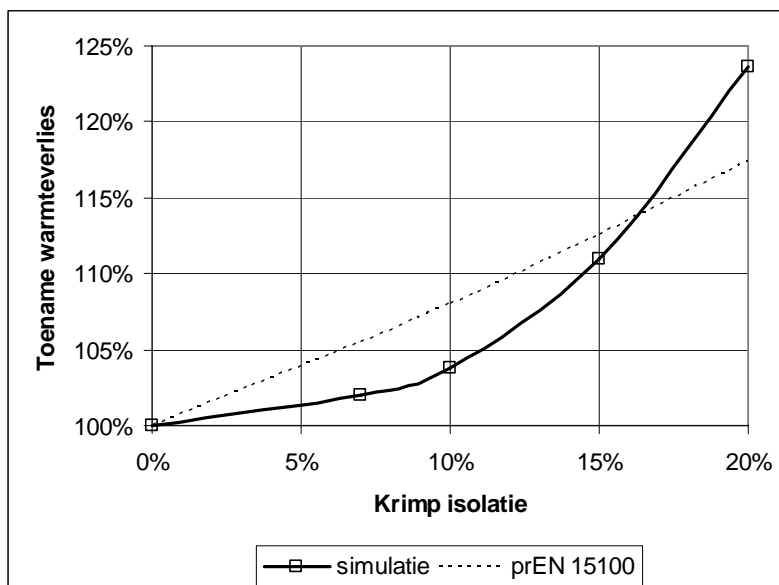
Het enige na-isolatiemateriaal dat een sterke krimp vertoont is het UF-schuim. We gaan hier na in hoeverre convectie de thermische prestatie van een met UF-schuim gevulde spouwmuur kan beïnvloeden. We doen dit door de berekende U-waarde te vergelijken met een simulatie van de U-waarde met het programma 2DHAV (Janssens 2001), waarbij ook het optreden van natuurlijke convectie wordt gesimuleerd. Dit gebeurt voor een spouwmuur met 6 cm brede spouw en halfzwaar binnenspouwblad (materiaaleigenschappen volgens Tabel 4).

Figuur 11 toont de relatieve toename van het warmteverlies door de spouwmuur in functie van de lineaire krimp van het isolatiemateriaal, berekend volgens de vereenvoudigde methode van prEN 15100-1. Bij de berekening van de U-waarde volgens deze methode wordt de invloed van krimp in rekening gebracht door een aangepaste warmtegeleidingscoëfficiënt λ_a van het gekrompen schuim te definiëren (zie hoger). De invloed van convectie wordt niet expliciet ingerekend, maar ter compensatie verwaarloost men de warmteweerstand van de aan één of beide zijden van het schuim gevormde luchtlagen.

Figuur 11 toont eveneens de toename van het warmteverlies berekend met het programma 2DHAV, dat een nauwkeurige berekening van het warmtetransport door geleiding, convectie en straling uitvoert. De simulatie werd uitgevoerd voor een 3 m hoge muur met een temperatuurverschil van 30°C tussen binnen en buiten. Voor de simulatie werd een scheurpatroon gedefiniëerd bestaande uit twee even brede luchtlagen aan weerszijden van de isolatie, en krimpscheuren op regelmatige afstand over de hoogte van de isolatielaag. Dit scheurpatroon laat toe de maximale invloed van natuurlijke convectie te bepalen. Uit de resultaten blijkt dat de

vereenvoudigde berekening volgens prEN 15100-1 aan de veilige kant is zolang de lineaire krimp kleiner is dan 16%. In dit geval blijft de stromingsweerstand van de krimpscheuren relatief groot waardoor de lucht in de luchtlaagjes weinig beweegt en de luchtlaagjes een niet-verwaarloosbare bijdrage leveren tot de warmteweerstand van de wand. Dit betekent dat de (positieve) invloed van de warmteweerstanden van de luchtlagen op het warmteverlies belangrijker is dan de (negatieve) invloed van convectie. Bij een lineaire krimp groter dan 16% kan het effect van natuurlijke convectie domineren en leidt de vereenvoudigde prEN-methode tot een onderschatting van het warmteverlies.

Bij de onderzochte UF-monsters werd een lineaire krimp vastgesteld van 10.0%. In dit geval is de gesimuleerde invloed van natuurlijke convectie beperkt tot 4%. Bij toepassing van de vereenvoudigde berekeningsmethode van prEN 15100-1 hoeft dit effect dus niet bijkomend in rekening gebracht te worden.



Figuur 11: Relatieve toename van het warmteverlies doorheen een spouwmuur met 6 cm brede spouw in functie van de krimp van het isolatiemateriaal; de simulatie houdt rekening met natuurlijke convectie.

Vochteigenschappen

Voor het behoud van de regenwerende functie van een spouwmuur is het essentieel dat het na-isolatiemateriaal geen water opneemt. Dit werd voor de verschillende materialen getest door middel van de wateropnameproef bij gedeeltelijke onderdompeling (EN 1609). Aanvullend werd de dampdoorlatendheid van het isolatiemateriaal bepaald met behulp van de cuptestmethode volgens NBN EN ISO 12572.

Wateropname

De wateropname wordt gemeten door een vierkant proefstuk met zijde 200 mm gedeeltelijk onder te dompelen in water (10 mm). Voor aanvang van de proef wordt het drooggewicht M_0 gewogen. Na 24 h wordt het proefstuk opnieuw gewogen nadat het gedurende 10 minuten is uitgelekt (Figuur 12). De wateropname bij kortstondige gedeeltelijke onderdompeling W_p (kg/m²) volgt uit:

$$W_p = \frac{M_{24} - M_0}{A_p}$$

met A_p : de oppervlakte van het ondervlak van het proefstuk (m²).

De Europese pre-normen voor na-isolatiematerialen leggen geen expliciete eisen op aan de wateropname, behalve de norm voor minerale wol (prEN 14064-1). Deze stelt dat de wateropname W_p niet groter mag zijn dan 1 kg/m². Dit komt neer op een indringing van het vochtfront tot een maximale diepte van 1 mm. Ter vergelijking: een regenwerende buitenbepoelstering mag maximaal 2.45 kg/m² water opnemen in 24h (Hens 1999).



Figuur 12: Uitlekken van de proefstukken na de wateropnametest.
De vezelvormige isolatiematerialen werden gevat in een bekisting van metaaldraad.

De volgende materialen werden getest: UF-schuim (5 monsters), PUR-schuim (9 monsters), EPS-w (2 monsters), rotswol (14 monsters) en glaswol (17 monsters).

Voor het PUR-schuim bleek de wateropname te verschillen tussen materiaal dat via de testboxen bemonsterd werd (2 monsters), en materiaal dat door de fabrikant in een plastic zak was opgeschuimd en aangeleverd (7 monsters). In het laatste geval kon de film die zich vormt in het contactvlak tussen schuim en omhulling (hier een plastic zak) behouden blijven bij de monsternamen. Het was dit contactvlak dat ondergedompeld werd bij beproeving van de monsters van deze laatste categorie. De resultaten in Figuur 13 tonen aan dat de wateropname via een onbeschadigd contactvlak (blauwe staaf) kleiner is dan die via een vlak zonder contactfilm (bordeaux staaf).

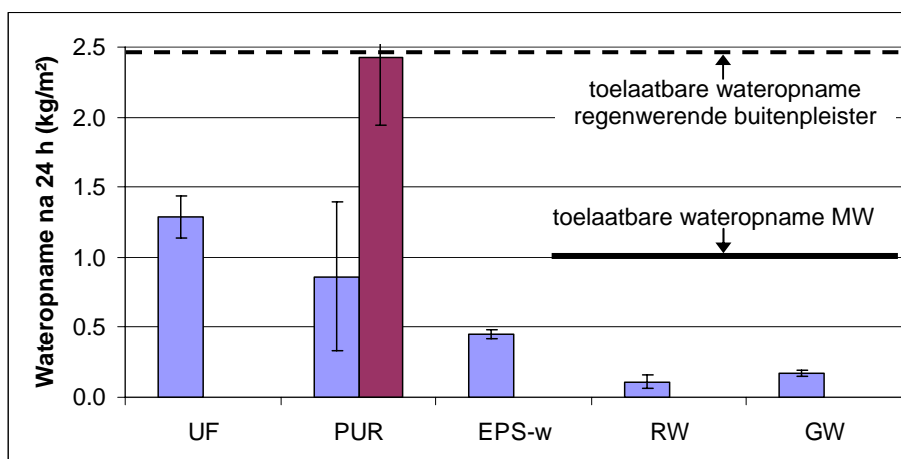
Voor het beproeven van EPS werden monsters gebruikt bestaande uit EPS-parels gebonden met lijm, zoals ook bij het inblaasproces gebeurt. De binding is echter beperkt zodat het onmogelijk is de monsters te manipuleren voor de test zonder ze te beschadigen. Daarom is de test uitgevoerd op slechts twee monsters met een sterkere binding (volumemassa 12 kg/m³).

De monsters uit minerale wol tenslotte werden gevat in een bekisting van metaaldraad (Figuur 12). Op deze manier werden monsters met verschillende volumemassa gerealiseerd. Er bleek echter geen correlatie tussen volumemassa en wateropname.

Figuur 13 en Tabel 6 vatten de meetresultaten samen. Hieruit blijkt dat de wateropname in minerale wol aanzienlijk kleiner is dan de maximaal toelaatbare waarde van 1 kg/m² die de prEN

voorstelt. De wateropname van de kunststofschuimen UF en PUR is een factor 10 groter dan die van minerale wol, maar blijft beperkt tot 1.4 kg/m² (gemiddelde + standaard deviatie). De wateropname van EPS situeert zich tussen die van de minerale wollen en de schuimen.

Ondanks de variatie in gemeten waarden kunnen we stellen dat de wateropname van alle geteste na-isolatiematerialen zodanig is, dat zij de functie van capillaire snede in de spouwmuur kunnen opnemen. Er is geen gevaar voor regendoorslag ten gevolge van capillariteit van het isolatiemateriaal. Dit is duidelijk als de gemeten waarden vergeleken worden met de toelaatbare wateropname van een regenwerende buitenbepleistering (2.45 kg/m²).



Figuur 13: Gemeten wateropname van na-isolatiematerialen: gemiddelden en standaard deviaties.

Tabel 6: Gemeten wateropname van na-isolatiematerialen

Materiaal	Aantal monsters	Wateropname na 24 h W_p (kg/m ²)	Standaarddeviatie (kg/m ²)
UF	5	1.29	0.15
PUR met film	7	0.86	0.53
PUR zonder film	2	2.42	0.48
EPS-w	2	0.45	0.03
RW	14	0.11	0.05
GW	17	0.17	0.02

Diffusieweerstandsgetal μ

De diffusie-eigenschappen van het isolatiemateriaal zijn niet van essentieel belang voor de hygrothermische prestaties van een nagevulde spouwmuur. Voor de volledigheid geeft deze paragraaf toch een overzicht van de gemeten diffusie-eigenschappen.



Figuur 14: Lege cup (links), en afgedekt met MW-monster (rechts).

De dampdoorlatendheid van het isolatiemateriaal werd bepaald met behulp van de cuptestmethode volgens NBN EN ISO 12572. Hierbij werden stalen bakjes (de 'cups') gevuld met zuiver water en afgedekt met een materiaalmonster (Figuur 14). De bakjes werden in een klimaatkamer geplaatst waarvan de temperatuur en relatieve vochtigheid constant werd gehouden (23°C, 50% R.V.). De diffusieweerstand Z van het monster werd afgeleid uit de geregistreeerde gewichtsafname van het bakje.

$$Z = \frac{G}{A\Delta p} - Z_s$$

met G de gewichtsafname (kg/m^2), A de oppervlakte van het proefstuk (m^2), Δp het dampdrukverschil tussen cup en klimaatkamer en Z_s de som van de overgangsweerstanden aan beide oppervlakken van het monster.

Het diffusieweerstandsgetal μ volgt uit de diffusieweerstand Z en de dikte d van het proefstuk:

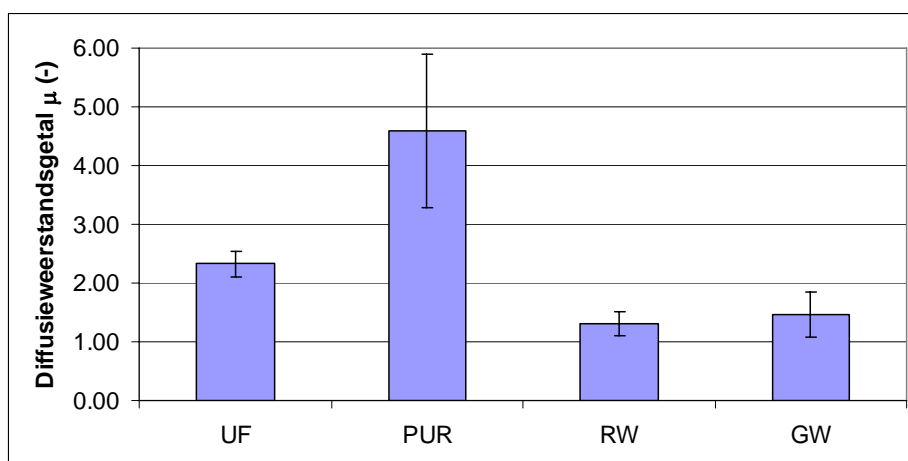
$$\mu = \frac{Z\delta_a}{d}$$

met δ_a de waterdampdoorlatendheid van stilstaande lucht (s).

Het diffusieweerstandsgetal drukt uit hoe veel keer dampdichter het materiaal is dan een laag stilstaande lucht met dezelfde dikte. De laagste waarde is dus per definitie gelijk aan 1: het materiaal is dan even dampdoorlatend als stilstaande lucht.

Van de na-isolatiematerialen werden telkens 4 monsters van UF-schuim, PUR-schuim, rotswol en glaswol getest. Voor het PUR-schuim waren er zoals bij de wateropnametest monsters zonder oppervlaktefilm (bemonsterd in de testbox) en met oppervlaktefilm (bemonsterd in plastic zak). Aangezien er geen significant verschil was tussen beide groepen monsters worden ze hier samen gevoegd tot 1 cijfer (8 monsters in totaal). Er werden ook EPS-monsters getest, maar omwille van de luchtdoorlatende structuur van de monsters konden geen fysisch correcte waarden van de diffusie-eigenschappen worden gemeten.

Figuur 15 geeft een overzicht van de meetresultaten. Hieruit blijkt dat alle geteste materialen gekenmerkt worden door een laag diffusieweerstandsgetal. Het voordeel hiervan is dat de materialen bij een incidentele bevochtiging in de spouw snel kunnen drogen. Het UF-schuim en de minerale wollen zijn zeer dampdoorlatend –dit is in overeenstemming met waarden uit de literatuur. De gemeten μ -waarde van het PUR-schuim, 4.6 ± 1.3 , is voor PUR-schuim een zeer lage waarde, zeker als men vergelijkt met literatuurwaarden voor PUR-isolatieplaten. De meting bevestigt echter dat het PUR-schuim dat ontstaat tijdens het watergeblazen injectieproces van spouwen een groot gehalte aan open cellen bevat (cf. discussie onder paragraaf 'veroudering').



Figuur 15: Gemeten diffusieweerstandsgetal van na-isolatiematerialen: gemiddelden en standaarddeviaties.