Duurzaamheid van houten gevels en houten constructies (houtskeletbouw)

Eline Vandenbussche

Promotoren: prof. Jan Moens, prof. ir. Joris Van Acker
Begeleider: Nathan Van Den Bossche

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. Pieter Uyttenhove

Vakgroep Bos- en Waterbeheer
Voorzitter: prof. Kris Verheyen

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2010-2011

UNIVERSITEIT GENT

Duurzaamheid van houten gevels en houten constructies (houtskeletbouw)

Eline Vandenbussche

Promotoren: prof. Jan Moens, prof. ir. Joris Van Acker
Begeleider: Nathan Van Den Bossche

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. Pieter Uyttenhove

Vakgroep Bos- en Waterbeheer
Voorzitter: prof. Kris Verheyen

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2010-2011

UNIVERSITEIT GENT

Deze pagina is niet beschikbaar omdat ze persoonsgegevens bevat.
Universiteitsbibliotheek Gent, 2021.

This page is not available because it contains personal information.
Ghent University, Library, 2021.

Duurzaamheid van houten gevels en houten constructies (houtskeletbouw)

Eline Vandenbussche

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Promotoren: prof. Jan Moens, prof. ir. Joris Van Acker
Begeleider: Nathan Van Den Bossche

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. Pieter Uyttenhove

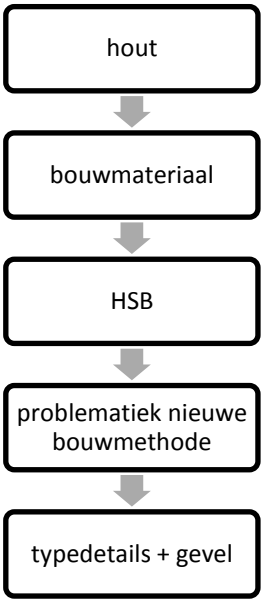
Vakgroep Bos- en Waterbeheer
Voorzitter: prof. Kris Verheyen

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2010-2011

KORTE INHOUD

Het doel van deze masterproef is te onderzoeken of en hoe houtskeletbouw als systeem voor thermisch optimale woningen in België kan ingezet worden. Het is een handboek voor architecten en anderen uit de bouwsector, die het houtskeletbouwsysteem willen toepassen.

Dit werk is opgebouwd uit verschillende niveaus. De eerste drie hoofdstukken zijn vervat in een lijvig, encyclopedisch deel, dat een soort inleiding vormt op de twee laatste hoofdstukken.



Om de toepassing van hout als bouwmateriaal te onderzoeken, is het belangrijk een basisnotie te hebben van de randvoorwaarden van het materiaal op zich. Daarna kan het materiaal aangewend worden in houtskeletbouw. Dit systeem leent zich goed tot de steeds strengere wettelijke eisen op het gebied van energieprestatie in gebouwen, in toepassing in de bouwmethode met dikke isolatiepakketten en een optimale luchtdichtheid. De relatief nieuwe bouwmethode brengt echter nieuwe problemen met zich mee die dienen onderzocht te worden. Met behulp van de simulatieprogramma's Bisco, WUFI en WUFI-Bio wordt het risico

op schimmels en condensatie geëvalueerd. De simulaties worden gedaan op vier veel voorkomende typedetails van bouwknopen, die in de toekomst in de praktijk zullen gebruikt worden. Ze worden getoetst aan de EPB-regelgeving voor bouwknopen en aan de voorgaande hoofdstukken. Drie van de vier bouwknopen blijken te voldoen aan EPB- en PHP-normen voor een koudebrugarme bouwknoop. Het risico op schimmelvorming is over het algemeen laag. Tenslotte wordt ook een 'best practice' opgesteld om de duurzaamheid van houten gevelbekleding te garanderen.

Trefwoorden: hout, houtskeletbouw, duurzaamheid, bouwknopen, schimmels.

Extended abstract

The objective of this research is to examine whether and how timber frame construction can be used as a system for thermally optimal accommodations in Belgium. It is a manual for architects and others from the construction industry, who want to apply the timber frame construction system.

This work is composed of different levels. The first three chapters are embodied in a substantial, encyclopedic part, that forms an introduction to the last two chapters.

To investigate the adaptation of wood as a building material, it is important to have a basic knowledge of the boundary conditions of the material. Subsequently, the material can be used in timber frame construction. This system is adequate for the increasingly stricter statutory requirements concerning energy performance in buildings, in the adaptation in the building method with thick isolation layers and an optimal airtightness. However, the relatively new building method brings along new problems, that need to be examined. With the help of the simulation programs Bisco, WUFI and WUFI-Bio the risk of mould and condensation are evaluated. The simulations are executed on four commonly used building details of thermal bridges, which will be used in practice in the future. They are tested against the EPB-rules for thermal bridges, and against the previous chapters. Three out of four thermal bridges seem to meet the EPB- and PHP-standards for well-designed thermal bridges. The risk of mould development is generally low. Finally, a best practice is formulated to guarantee the durability of a wooden façade facing.

Key words: wood, timber frame construction, durability, thermal bridges, mould.

Inhoudstafel

1. INLEIDING 1

2. HET MATERIAAL HOUT 3

2.1 Macroscopische boomstructuur [4] 3

2.2 Microscopische houtstructuur [4] 5

2.3 Moleculaire opbouw [4] 6

2.4 De hoofdrichtingen van hout 6

2.5 Hout en vocht 7

2.6 De fysische en mechanische eigenschappen van hout 12

2.7 Zaagwijzen 14

2.8 Houtaantasting 16

2.8.1 Atmosferische invloeden 17

2.8.2 Biologische invloeden 17

2.9 Fotosynthese 18

2.10 Gedrag bij brand 18

3. HOUT ALS BOUWMATERIAAL 19

3.1 Vergelijking met andere bouwmaterialen. 20

3.2 Normen, eisen en voorschriften 21

3.2.1 CE-markering 21

3.2.2 Technische Goedkeuring 21

3.2.3 Technische Specificaties 22

3.2.3.1 STS 04 22

Gebruiksklassen 23

3.2.3.2 STS 23 25

3.2.3.3 STS 31 25

3.2.3.4 STS 52.1 25

3.3 Natuurlijke duurzaamheid en duurzaamheidsklassen 25

3.3.1 Kerkhofproef 26

3.3.2 Alternatieve methode voor de bepaling van de natuurlijke duurzaamheid - Edlund en Nilsson 27

3.3.3 Klimaatindex van Scheffer 28

3.4 Gebruiksklasse – duurzaamheidsklasse 29

3.5 Weerstand tegen insecten 30

3.6 Houtbehandeling 32
3.6.1 Houtafwerking [4] 32
3.6.2 Chemische verduurzaming [4] 34
3.6.2.1 Curatieve houtbehandeling 36
3.6.3 Houtmodificatie [4] en [32] 36
3.6.3.1 Thermische houtmodificatie 37
3.6.3.2 Chemische houtmodificatie 38
3.6.3.3 Hydrofobering 39

3.7 Protection by design 40

3.8 Gebruikte houtsoorten 40

3.9 Gedrag bij houtaantastende insecten [4] en [52] 42
3.9.1 Voorwaarden voor insectenaantasting 43
3.9.2 Houtaantastende insecten 44
3.9.3 Preventieve houtbescherming tegen insecten 45
3.9.4 Curatieve houtbescherming tegen insecten 46

4. HOUTSKELETBOUW 47

4.1 LCA: ecologische duurzaamheid 47

4.2 Bouwtechnische duurzaamheid 49

4.3 Houtskeletbouw in België 49

4.4 Houtskeletbouw: systeem 51
4.4.1 Normen, eisen en voorschriften 51
4.4.2 Definitie houtskeletbouw 51
4.4.3 Algemene opbouw [6] 54
4.4.3.1 Gebruikte materialen: isolatie [82] 55
4.4.3.2 De luchtdichtheid - dampremmende laag [82] 55
Dampdichte aansluiting houtderivaatplaten. 58
Luchtdichte aansluiting tussen betonplaat en HSB-wand. 59
Luchtdichte aansluiting tussen dampremmende laag en dakraam. 59
Luchtdichte aansluiting tussen dak en HSB-wand. 60
Luchtdichte aansluiting tussen schrijnwerk en pleisterwerk. 60
Luchtdichte aansluiting tussen schrijnwerk en HSB-wand 60
4.4.4 Constructie- en materiaaleigenschappen 61
4.4.4.1 Aansluiting met de fundering 61
4.4.4.2 Elementaire wandopbouw 64
4.4.4.3 Sanitaire ruimtes 69
4.4.4.4 Elementaire vloeropbouw 69
4.4.4.5 Elementaire dakopbouw 73
Hellend dak 73
Sporenkap 73
Gordingkap 75

Flauw hellend dak 75
Plat dak 75
4.4.5 Akoestische isolatie 77

4.5 De voor- en nadelen van houtskeletbouw [50] 77

5. THEORETISCHE PROBLEMATIEK VAN DE NIEUWE BOUWMETHODE 83

5.1 Dampopen constructie-principe 83

5.2 Vochtbronnen 85

5.3 Vochttransport 87

5.4 Vocht vermijden 88
5.4.1 Protection by design 88

5.5 Gevolgen van vocht 90
5.5.1 Anisotrope vormveranderingen 90
5.5.2 Zwammen/schimmels 90
5.5.2.1 Schimmels die de celwand aantasten 90
5.5.2.2 Schimmels die de celwand niet aantasten 92
5.5.2.3 Voorwaarden voor schimmelontkieming en schimmelgroei 93
Sporen 93
Voedingsbodem 93
Vochtgehalte van het hout 94
Zuurstof 96
Temperatuur 96
Toxische stoffen 97
Licht en zuurtegraad van het hout 97
5.5.2.4 Curatieve behandeling 97
5.5.2.5 Schimmelaantasting vermijden 98
5.5.2.6 Schimmelontwikkeling voorspellen 99
Isopleten 99
Biohygrothermisch model 101
Schimmelindex 102
Dosis-reactiemodel 103

6. ONDERZOEK 105

6.1 Bouwknopen 105
6.1.1 Wetgeving bouwknopen 105
6.1.2 Berekeningsmethodiek bouwknopen 105
6.1.3 Thermische prestatie van bouwknopen 106
6.1.4 EPB-aanvaarde bouwknopen 108
6.1.4.1 Typedetails 109
Beoordeling van de typedetails: EPB-aanvaard? 109
Beoordeling van de typedetails: PHP-aanvaard? 110

6.2 Bisco 111

6.2.1 Vereenvoudigingen aan het geometrisch model 112
6.2.2 Rekenmethode 113
6.2.2.1 Funderingsaanzet op volle grond 113
6.2.2.2 Schrijnwerk 114

6.3 WUFI 115
6.3.1 Verschillen met de Glasermethode 115
6.3.2 Testmethode 116
6.3.3 Invoergegevens 116
6.3.3.1 Opbouw wand 116
6.3.3.2 Oriëntatie van de wand 117
6.3.3.3 Initiële omstandigheden 117
6.3.3.4 Klimaat 118
Het buitenklimaat 118
Het binnenklimaat 119
6.3.3.5 Initieel vochtgehalte bouwmaterialen 119
6.3.4 Uitvoergegevens 119
6.3.5 Resultaten 121
6.3.5.1 Evaluatie van de resultaten 121
6.3.6 Simulaties 121
Algemene opbouw - houtdoorsnede 121
Algemene opbouw – isolatiedoorsnede 124
Doorsnede ter hoogte van de funderingsaansluiting 125
Invloed parameters buitenste materiaallaag 127
Invloed materiaal binnenoppervlak 129
Invloed vochtbron:lek 129

6.4 WUFI-Bio 130
6.4.1 Invoergegevens 132
6.4.1.1 Het klimaat 132
6.4.1.2 Substraat 132
6.4.2 Resultaten 133
6.4.2.1 Evaluatie van de resultaten 133
6.4.3 Simulaties 134
Algemene wandopbouw - houtdoorsnede 134
Algemene wandopbouw - isolatiedoorsnede 135
Doorsnede ter hoogte van de funderingsaansluiting 135

6.5 De typedetails 139
6.5.1 Aanbevelingen 139
6.5.2 Bespreking, algemene opbouw en algemene aanbevelingen 139

6.6 Zes vuistregels voor een duurzame houten gevel 153

7. CONCLUSIE 161

8. BIJLAGEN 165

8.1 Bijlage 1: Het gedrag bij brand van hout(en constructies) 165

8.2 Bijlage 2: Gedetailleerde berekening ψ-waardes 165

8.3 Bijlage 3: Zijn de typedetails EPB-aanvaard? 165

8.4 Bijlage 4: Vergelijking tussen het Belgische klimaat (Ukkel) en het klimaat in Kassel (Duitsland) 165

8.5 Bijlage 5: Typedetails 165

8.6 Bijlage 6: Gevel 165

REFERENTIES 167

Tabel van afkortingen en symbolen

ATG	Agrément Technique/Technische Goedkeuring
BKK	Binnenklimaatklasse
BUtgb	Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw
BVHB	Belgische Vereniging voor Houtbescherming
ETA	European Technical Approval / Technische Europese goedkeuring
GGH	Gelijmd gelamelleerd hout
GWP	Global warming potential
HSB	Houtskeletbouw
LCA	Levenscyclusanalyse (Life cycle analysis)
LCI	Levenscyclusinventarisatie (Life cycle inventory)
LIM	Laagste isopleet voor schimmelgroei (Lowest Isopleth for Mould growth)
LVL	Laminated Veneer Lumber
NBN	Norme Belge – Belgische Norm
NPV	Net present value
OSB	Oriented Strand Board
RV	Relatieve vochtigheid
STS	Spécifications Techniques/Technische Specificaties
TCHN	Technisch Centrum voor de Houtnijverheid
VEA	Vlaams Energieagentschap
VIBE	Vlaams Instituut voor Bio-Ecologisch Bouwen en Wonen
VVP	Vezelverzadigingspunt
WFC	Wood Frame Construction
WTCB	Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf
WUFI	Niet-stationair warmte- en vochttransport (Wärme- und Feuchtetransport instationär) (berekeningsprogramma)

Symbool	Eenheid	Betekenis
R	$(m^2.K)/W$	Warmteweerstand
u	%	Houtvochtgehalte
U	$W/(m^2.K)$	Warmtedoorgangscoëfficiënt
α	$W/(m^2.K)$	Warmteovergangscoëfficiënt
λ	W/(m.K)	Warmtegeleidbaarheid van een bouwmateriaal
ψ	W/(m.K)	Lineaire warmtedoorgangscoëfficiënt
Φ	W	Warmtestroom
X	W/K	Puntwarmtedoorgangscoëfficiënt

1. Inleiding

Dit werk wil een handboek voor architecten zijn dat ze ter hand kunnen nemen voor basiskennis over het materiaal hout, houtskeletbouw, de theoretische problematiek wat betreft condensatie, schimmels, houtrot, ...

Het doel van deze scriptie is te onderzoeken welke schadegevallen met het gebruik van hout kunnen samengaan, en of het verstandig is om te bouwen met hout in het Belgische gemengd klimaat. Bieden de systemen die we momenteel gebruiken voldoende waarborg of dienen zij vervangen te worden door andere systemen die schade meer uitsluiten? Deze tekst vormt geen ode aan hout, want ondanks interessante voordelen, zijn er toch ook heel wat nadelige eigenschappen zoals de gevoeligheid voor beschadiging door bacteriën en fungi. Deze kunnen echter verholpen worden door een goede uitvoering, goed onderhoud, en een goed gebruik van het bouwwerk. Deze 'best practice' wordt later in het werk voorgesteld.

De omvang van het begrip 'duurzaamheid' is niet te vatten in één definitie. Wanneer men het woord 'duurzaam' ontleedt, zou men het als volgt kunnen definiëren: iets wat geschikt is te duren, iets wat meegaat. Duurzaamheid schijnt uiteen te vallen in twee onderdelen: ecologische duurzaamheid en bouwtechnische duurzaamheid.

Volgens VIBE betekent duurzaamheid:

> *'Bouwen op zo'n manier dat wereldwijd een gezonde, ecologische en sociaal aanvaardbare leefomgeving geschapen en gevrijwaard wordt voor de huidige én de toekomstige generaties. Duurzaam bouwen streeft naar een optimaal gebruik van lokaal beschikbare hernieuwbare grondstoffen en energiebronnen.'*

Ecologische duurzaamheid wil zeggen dat het gebruik van het materiaal hout voor lange tijd verzekerd wordt, bijvoorbeeld door duurzaam bosbeheer [79]. Deze soort duurzaamheid heeft te maken met de impact op het milieu. Ze komt er vanuit het besef dat energiebronnen en sommige materialen op aarde niet onuitputtelijk zijn.

Duurzaamheid kan ook zijn:

> *'De mogelijkheid van een gebouw, onderdeel, product of constructie om het te kunnen gebruiken voor een gewenste en verwachte duur.'* [43]

Dit is de bouwtechnische duurzaamheid, die afhankelijk is van de natuurlijke duurzaamheid van het houten element, andere materiaaleigenschappen en van de hygrothermische omgeving waarin het toegepast wordt. Deze vorm van duurzaamheid heeft te maken met de levensduur van een bepaalde toepassing. Dit is de tijdsperiode waarbinnen het element zijn functie kan blijven vervullen.

In de volgende hoofdstukken worden eerst de eigenschappen van hout behandeld, op thermisch, hygrisch, mechanisch, fysisch, ... niveau. Vervolgens wordt hout als bouwmateriaal behandeld, waarbij de eigenschappen van hoofdstuk 2 getoetst worden. In hoofdstuk 4 wordt nog een stap verdergegaan, en gaat het over (de duurzaamheid van) houtskeletbouw. Opnieuw wordt verwezen naar de twee vorige hoofdstukken. In hoofdstuk 5 komt de theoretische problematiek van de nieuwe bouwmethode ter sprake. Schimmels, houtrot, condensatie, ... worden behandeld, net als 'protection by design'. In hoofdstuk 6 tenslotte worden vier typedetails (funderingsaansluiting, schrijnwerk, plat dak en hellend dak) besproken, waarbij ze opnieuw worden getoetst aan de vorige hoofdstukken. Er worden eveneens zes vuistregels opgesteld voor een duurzame houten gevelbekleding.

2. Het materiaal hout

Om de schadegevallen van hout te onderzoeken, is het nodig voldoende inzicht te hebben in de opbouw en de samenstelling van het materiaal hout. Veel gevallen verklaren zich immers vanuit die specifieke eigenschappen. Een goede kennis van het materiaal is essentieel voor verantwoord houtgebruik. Het encyclopedische deel over het materiaal hout dat hieronder volgt, is geenszins volledig, maar is een basiskennis die nodig is om het materiaal hout toe te passen.

Opmerking: In deze scriptie wordt verondersteld dat het hout geen contact maakt met de grond.

2.1 Macroscopische boomstructuur [4]

Het materiaal hout vervult in de boom drie functies:

- sterkte verschaffen tegen uitwendige belasting,
- saptransport door de cellen en
- voedingsstoffen opslaan.

Niet alle cellen in de boom hebben dezelfde functie, waardoor ook hun opbouw en aard verschilt van elkaar.

Centraal in de boomstam bevindt zich het merg of het hart. Oorspronkelijk was dit het hout van de jonge boom, dat zorgde voor het saptransport en de opslag van voedingsstoffen (water en minerale stoffen) die door de wortels uit de bodem zijn opgenomen. Naarmate de boom echter groeit in de breedte, wordt die functie geleidelijk aan overgenomen door het nieuwer gevormde hout.

Het merg wordt gekenmerkt door hout met een zachte structuur, en is bijgevolg erg gegeerd bij insecten. Rond het merg bevindt zich het kernhout, en daarrond het spinthout. Het kernhout zorgt voor de sterkte en de stijfheid van de boom. De levende cellen in het spinthout verzorgen het saptransport opwaarts via houtvaten voor bladeren, bloesems en vruchten. Naargelang de boom groter wordt, zijn niet meer alle cellen van de boom nodig voor het transport van voedingsstoffen. De oudste cellen van het spinthout worden dan ook langzaam omgezet in kernhout: het hout 'verkernt' of 'verhout'. De celwand van de cellen wordt dikker en harder, het vochtgehalte daalt en de celholte of het lumen bevat minder voedingsstoffen. Het kernhout is veel donkerder van kleur door het neerslaan van de organische verbindingen.

Fig 1 Kleurverschil tussen kern- en spinthout (syllabus Constructieve aspecten van gebouwen, Jan Belis)

Bij de meeste boomsoorten is er een merkbaar kleurverschil tussen het kern- en spinthout. Het spinthout heeft meestal een zeer lage natuurlijke duurzaamheid (duurzaamheidsklasse V) en is dus vatbaar voor aantasting door insecten en schimmels (zie hoofdstuk 3 en 4). Kernhout is meestal veel duurzamer dan spinthout; bepaalde inhoudsstoffen hebben een sterk schimmeldodende werking, zoals onder andere het looizuur in eikenhout. Het kernhout staat in voor de biologische weerstand van de boom.

De verdeling van de boom in kern- en spinthout is niet bij alle bomen gelijk. Bij bepaalde boomsoorten bevatten de bomen tijdens de eerste tiental levensjaren nog geen kern, en bestaan dus nog geheel uit spinthout. Daarna verkernt het hout van het centrum van de boom. Dit zijn 'kernhoutbomen'. Bij grenen bijvoorbeeld begint de ontwikkeling pas na 25 jaar. Indien men de boom dan eerder velt, treft men aldus nog erg veel spinthout aan.
'Rijphoutbomen' zijn bomen waarbij het verschil tussen kern- en spinthout niet erg duidelijk is, zoals bij vuren. Bij deze bomen wordt het kernhout ook soms aangetast, omdat het onvoldoende afweerstoffen bevat.
Bij enkele boomsoorten tenslotte wordt er helemaal geen kernhout gevormd. Deze bomen bestaan, zoals de naam al doet vermoeden, geheel uit spinthout. Dit zijn 'spinthoutbomen'. De volledige houtmassa zorgt dan ook voor het transport en de opslag van voedingsstoffen. Deze bomen zijn erg gevoelig voor aantasting.
Het spinthout van kernhoutbomen wordt meestal als afvalhout gebruikt, terwijl men het spinthout van rijp- en spinthoutbomen kan aanwenden voor binnenafwerking. Dit mits het hout voldoende droog blijft, en het risico op insectenaantasting aanvaardbaar is.

Rond het kern- en spinthout bevindt zich het cambium. Deze laag maakt naar het merg toe nieuwe cellen aan voor het spinthout, en naar de schil toe het bastweefsel. Het

cambium zorgt dus dat de boom in omtrek toeneemt. De schil van de boom bestaat enerzijds uit een dode laag, de schors, en anderzijds uit een levende laag, de bast. De schors dient ter bescherming van de onderliggende lagen. De in de bladeren verwerkte voedingssappen worden via de bast vervoerd en vervolgens opgeslaan in de celstructuur van het spinthout.

Elk jaar wordt een nieuwe jaarring gevormd, een concentrische groeiring. De jaarringen worden in het Belgische gematigd klimaat duidelijk afgetekend, door de relatief grote klimaatsverschillen. De jaarring bestaat deels uit vroeghout, dat licht van kleur is en gevormd wordt in de lente, en een deel laathout, dat donkerder is, en gevormd wordt in de zomer. Het vroeghout bestaat uit grote cellen en weinig vezels. Tijdens het voorjaar moet het immers veel water voor de snelle groei na de winter doorlaten[1]. Het laathout is dichter van structuur (zie ook fig.2).

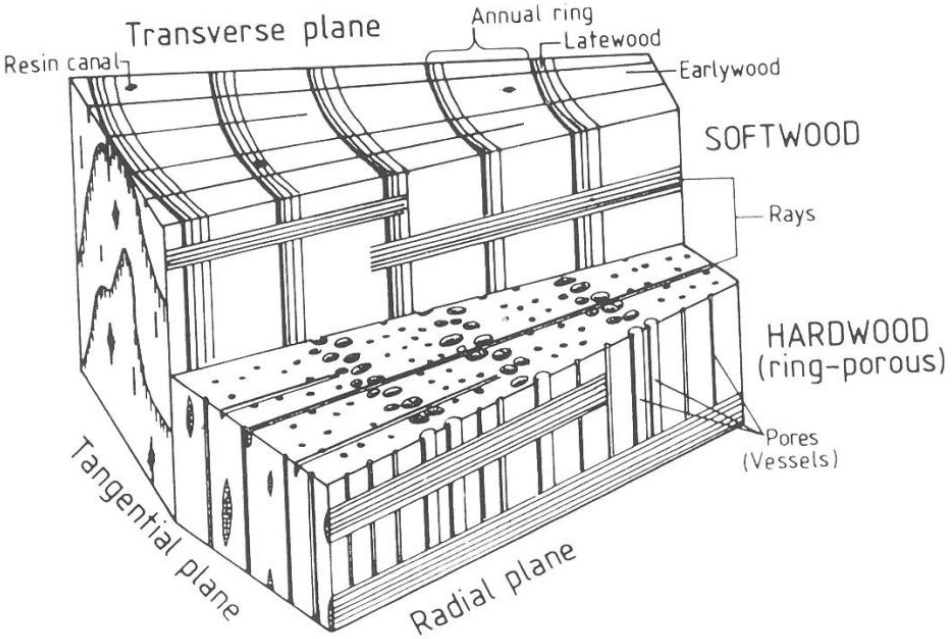


Fig 2 Voorbeelden van een blok naaldhout en loofhout met de hoofdvlakken m. b.t. de anisotropie [58]

2.2 Microscopische houtstructuur [4]

Hout is een poreus materiaal, met een grote inwendige poriënoppervlakte. De poriën maken zo'n 50 à 60% uit van het houtvolume, afhankelijk van het volumegewicht. Vocht en houtbeschermingsmiddelen worden bijvoorbeeld door capillaire zuiging meteen geabsorbeerd.

[1] In het Belgische klimaat groeien bomen enkel vanaf de lente tot het einde van de zomer.
[2] Dit is in de buitenlucht. In het binnenklimaat schommelt de RV eerder tussen 30 en 60%.

Hout is ook een cellulair materiaal, dat wil zeggen dat het is samengesteld uit cellen. De cellen vormen langgerekte, holle vezels die volgens de as van de boom liggen.

2.3 Moleculaire opbouw [4]

Het houtweefsel is in hoofdzaak chemisch samengesteld uit drie elementaire polymeren: cellulose (40-60%), lignine (18-40%) en hemicellulose (15-35%).

Cellulose bestaat uit een lange ketting van glucosemoleculen. Lignine vult de ruimtes tussen de cellulosemoleculen op en fungeert zo als versterkende stof in het weefsel. Hemicellulose vormt een matrix waarin de cellulosemoleculen liggen, en zorgt voor de samenkitting van de cellen. Dit verklaart waarom hout bij het stomen buigbaarder wordt. De hemicellulose wordt dan slapper en houdt de cellen minder samen.

2.4 De hoofdrichtingen van hout

De organische houtmassa is anisotroop: het soort cellen, de afmetingen en verdeling van de cellen en ook het aantal cellen zijn niet alleen afhankelijk van de plaats in de stam van de boom, ze verschillen ook van houtsoort tot houtsoort. De fysische, mechanische en andere eigenschappen van het hout zijn daardoor niet in alle richtingen gelijk. Er zijn drie hoofdrichtingen in de boomstam. De axiale of longitudinale richting loopt evenwijdig met de as van de boom. De transversale richtingen, d.i. de radiale en tangentiale richting, staan beiden loodrecht op de as van de boom. De radiale richting loopt van het middelpunt van de stam naar de omtrek ervan. De tangentiale richting loopt evenwijdig met de groeiringen van de boom.

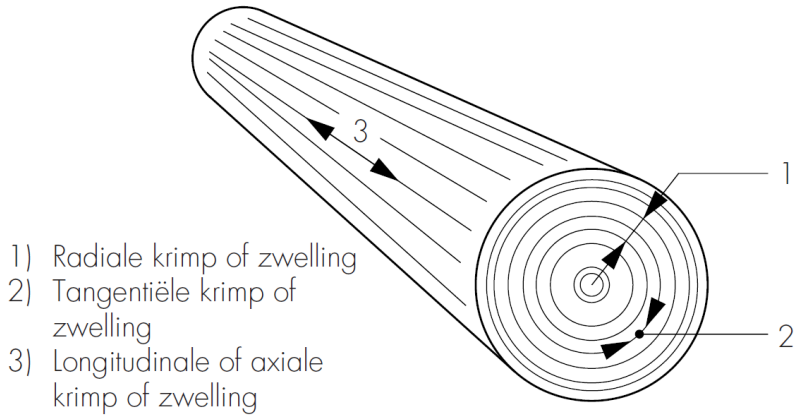


Fig 3 Hygrische beweging van hout (WTCB, Houten vloerbedekkingen: plankenvloeren, parketten en houtfineervloeren, TV 218, december 2000, p. 47)

2.5 Hout en vocht

Hout is hygroscopisch: de celwand van het hout wisselt vocht uit met zijn omgeving tot het houtvochtgehalte in evenwicht is met de RV van het binnenklimaat van het vertrek. Uiteraard gebeurt dit enkel indien het oppervlak onbehandeld is en dus vrij kan adsorberen. Indien de houtconstructie van het binnenklimaat afgeschermd is door middel van het dampscherm, heeft het hout een te verwaarlozen impact op de vochtregeling in het vertrek. Hout als afwerkingsmateriaal zou wel mee voor een stabiele luchtvochtigheid (waarbij er geen grote pieken zijn) zorgen. Het is echter wel zo dat er naast hout nog andere bouwmaterialen bestaan die hygroscopisch van aard zijn. Een gebouw dat compleet niet-hygroscopisch is, bestaat dan ook niet. De stabilisatie van de luchtvochtigheid kan dus niet enkel aan het hout toegeschreven worden.

Het houtvochtgehalte is dus afhankelijk van de relatieve vochtigheid. Aangezien de RV steeds schommelt, schommelt het houtvochtgehalte ook. Ovendroog hout heeft een vochtgehalte van circa 0%. Deze toestand kan enkel bereikt worden in laboratoria, met behulp van ovens. Het houtvochtgehalte in gebouwen met centrale verwarming, ligt tussen 6 à 9%. Het vocht wordt door het hout opgenomen of geabsorbeerd, in drie opeenvolgende stappen. Eerst is er de chemisorptie, voor houtvochtgehaltes tot ongeveer 6%, daarna is er adsorptie, tot 15%, en tenslotte capillaire condensatie, tot het vochtgehalte het vezelverzadigingspunt (VVP), gemiddeld 28%, bereikt. Het vocht dat boven het VVP nog wordt opgenomen, wordt niet geabsorbeerd, maar wordt door capillaire zuiging opgenomen in de macrocapillaire poriën.

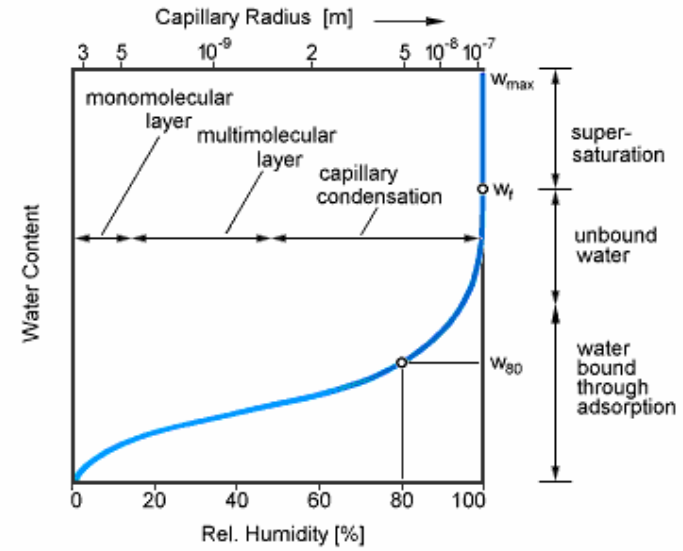


Fig 4 Relatie tussen het vochtgehalte van hout, en de relatieve vochtigheid, met de verschillende processen voor wateropname [84].

Als het hout zich voldoende lang in een omgeving met constante omstandigheden van RV en temperatuur bevindt, dan zal het hout na opnemen of afgeven van vocht, zijn

evenwichtsvochtgehalte bereiken. Het evenwichtsvochtgehalte is het vochtgehalte waarbij er evenwicht is tussen het houtvochtgehalte, de relatieve vochtigheid en de omgevingstemperatuur. Dit evenwichtsvochtgehalte is afhankelijk van de RV volgens onderstaande tabel. In werkelijkheid komt het evenwichtsvochtgehalte in normaal gebruikte gebouwen niet voor, aangezien de omstandigheden daar niet constant zijn.

Relatieve vochtigheid (RV)	Evenwichtsvochtgehalte van hout (EV)
40%	cc. 7-9%
60%	cc. 11-13%
80%	cc. 16%
90%	cc. 21%
100% (vezelverzadigingspunt)	cc. 28%

Tabel 1 Evenwichtsvochtgehalte i.f.v. de relatieve vochtigheid bij een temperatuur van 20°C [4].

Het hout verandert van afmetingen als het houtvochtgehalte verandert. Indien het houtvochtgehalte kleiner is dan het evenwichtsvochtgehalte, zwelt het hout. De watermoleculen die het opneemt uit de omgeving, stapelen zich op tussen de fibrillen, waardoor de celwanden uitzetten. De zwelling maakt duidelijk waarom een parketvloer kraakt bij vochtig weer, of waarom houten deuren dan iets meer knellen. Bij het krimpen worden de watermoleculen weer afgegeven, en wordt de ruimte tussen de fibrillen weer samengedrukt. De dimensieverandering van het hout wordt ook wel 'werken' genoemd. Het werken van het hout is veel opmerkelijker in de dwarsrichting (tangentiaal of radiaal) dan in de lengterichting. Dit komt omdat het water makkelijker aangezogen wordt langs het kopse hout. Dit is het houtvlak loodrecht op de vezelrichting. Het vocht dat daarmee in contact staat, kan tussen de houtvezels indringen. Het is dan ook belangrijk om de uiteinden van balken te beschermen.

Voor de meest voorkomende waarden voor het houtvochtgehalte van 5 tot 20% kan men aannemen dat er een nagenoeg lineair verband bestaat tussen afmetings-veranderingen en vochtgehalte.

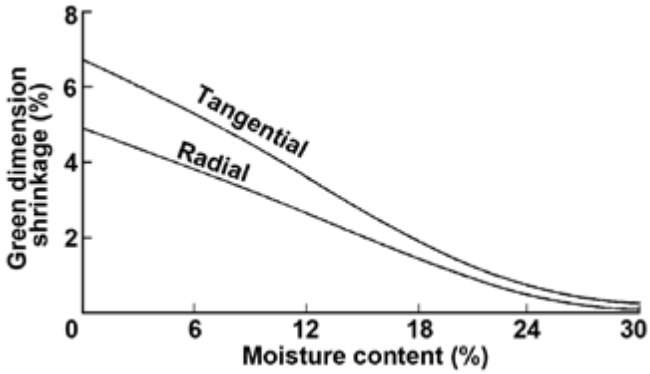


Fig 5 Verband tussen vochtgehalte van het hout en de afmetingsverandering [5]

In de praktijk rekent men voor het gemak dan ook vaak met dat benaderend lineair verband. De vormverandering kan men dan berekenen met de volgende formule [5]:

$$\Delta D = D_i \times \left[C_T\left(M_f - M_i\right)\right] \quad (1)$$

met ΔD: de vormverandering, D_i: de afmetingen voor de vochtverandering, C_T of C_R: respectievelijk de tangentiale en radiale vormveranderingscoëfficiënt (deze verschillen per houtsoort), M_f: het vochtgehalte na vochtgehalteverandering en M_i: het initiële vochtgehalte.

De krimp in longitudinale richting is zeer klein in vergelijking met de krimp in radiale en tangentiale richting. Zoals op figuur 5 nog te zien is, is de krimp in radiale richting normaal gezien kleiner dan die in tangentiale richting. In de praktijk rekent men dat naaldhout gemiddeld zwelt of krimpt met zo'n 1.5mm/m in radiale richting, 3mm/m in tangentiale richting en 0.1mm/m in axiale richting, per procent vochtgehalteverandering [4] en [5]. Indien het vochtgehalte toeneemt met een paar procent, is zo'n dimensieverandering niet onbelangrijk. In bepaalde toepassingen is het dan ook belangrijk om een zekere speling te voorzien, of te werken met niet-massieve elementen. Zo zijn deuren gewoonlijk niet volledig opgebouwd uit massief hout, maar bestaan ze uit een houten kader dat bekleed wordt.

Houtsoorten worden ingedeeld volgens hun klasse van 'werken'. De som van de radiale en tangentiale dimensieveranderingen bij 60-90% RV[2], bepalen de klasse. Indien de som kleiner is dan 1.5, is de betreffende houtsoort zeer stabiel, is de som groter dan 3, dan is de houtsoort sterk werkend. Zo is Europees lorken bijvoorbeeld middelmatig stabiel werken (1.97), terwijl Siberisch lorken sterk werkend is (3.8). [52]

Hoe meer water door het hout opgenomen wordt, hoe minder sterk het samengehouden wordt door de celwand, en hoe meer het voorkomt als vrij water in de celwand. Eens de celwand verzadigd is (maar er dus nog geen vrij water in de celholte voorkomt), is het vezelverzadigingspunt (VVP) bereikt. Zolang het vezelverzadigingspunt niet bereikt is, gaat de opname van gebonden water door.

Het vezelverzadigingspunt verschilt naargelang de houtsoort, en ligt voor de meeste houtsoorten tussen 22 en 35%. Zo zijn het vezelverzadigingspunt van Oregon Pine en Noords Vuren (twee van de meest gebruikte constructiehoutsoorten in België) bijvoorbeeld respectievelijk 28 en 27% [75]. Meestal gebruikt men voor de eenvoud een gemiddelde waarde van 28%. Eens boven het vezelverzadigingspunt zwelt het hout niet meer.

Problemen met betrekking tot afmetingsveranderingen door vocht kunnen beperkt worden door hout te gebruiken dat een vochtgehalte heeft dat overeenkomt met de relatieve vochtigheid van de omgeving. Gewoonlijk heeft het net gezaagde hout een vochtgehalte van maximaal 20%. Het vochtgehalte bij verwerking moet volgens STS 52

[2] Dit is in de buitenlucht. In het binnenklimaat schommelt de RV eerder tussen 30 en 60%.

tussen 12 en 18% liggen. Tijdens de montage, en het gebruik van het gebouw, zal het vochtgehalte dalen en rond de 11 à 13% blijven. Dit wil dus zeggen dat het houtelement iets gekrompen is ten opzichte van toen het net 'vervaardigd' werd[3].

Afhankelijk van het vochtgehalte zorgt vocht voor een toename van de houtmassa (en dus een toename van de volumieke massa) en eventueel een toename van het houtvolume.

De volumieke massa wordt dan ook gegeven in functie van het vochtgehalte, doorgaans gebruikt men een waarde van 12% (ρ_{12}). Daarnaast geeft men ook vaak de volumieke massa die voorkomt bij het evenwichtsvochtgehalte, dat optreedt bij een temperatuur van 20°C en een relatieve vochtigheid van 65% [75].

Het vochtgehalte u is de verhouding van de massa van het water dat men kan onttrekken aan het hout (m_w) en de ovendroge massa van het hout (m_0) [5].

$$u = \frac{m_w}{m_0} \times 100 \quad [\%] \tag{2}$$

Het vezelverzadigingspunt kan ook berekend worden met behulp van de droge massa m_0 en de massa bij een bepaald vochtgehalte m_ω [5].

$$u = \frac{m_\omega - m_0}{m_0} \times 100 \quad [\%] \tag{3}$$

Bij het drogen van hout verdwijnt het water eerst uit de celholten tot het vezelverzadigingspunt is bereikt. Dit is het vrije water, dat niet op moleculair niveau gebonden is aan de celwand. Daarna wordt het gebonden water onttrokken aan de celwand door verdamping. Hiervoor is meer energie nodig, om de waterstofverbindingen en de Van der Waals-krachten te kunnen breken. Door de desorptie, krimpt het hout. De opname en afgifte van vocht gebeurt niet op dezelfde manier, maar via een hysteresislus.

[3] Men kan hout gebruiken met een lager vochtgehalte om de krimp te beperken. Het hout kan dan eerst gedroogd worden, doch men moet opletten voor de spanningen die hierbij kunnen ontstaan in het hout.

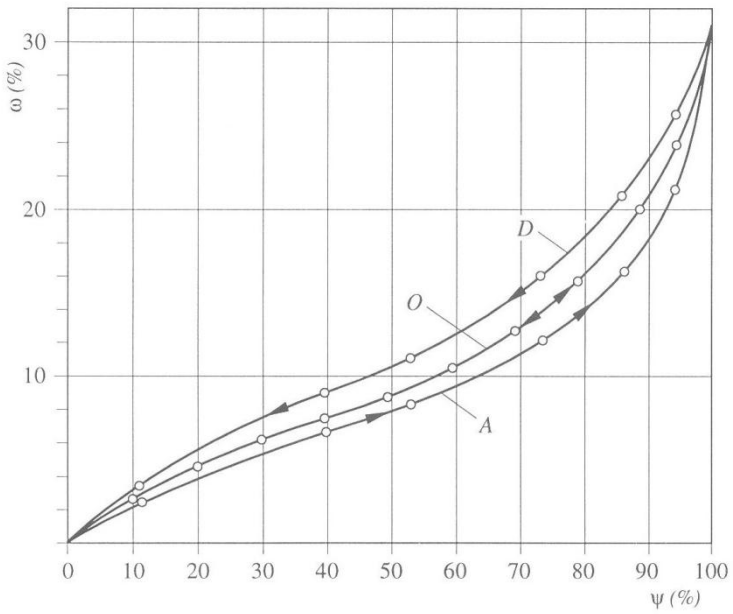


Fig 6 Sorptie-isothermen voor vurehout bij 20°C (Vochtgehalte ω_ψ t.o.v. de relatieve vochtigheid (ψ)) [58].

Hysteresis is een verschijnsel waarbij het hout met een bepaald volume bij vochtopname (adsorptie, A op fig.6) een ander evenwichtsvochtgehalte heeft dan bij vochtafgifte (desorptie, D op fig.6) bij eenzelfde relatieve vochtigheid van de ruimte. De sorptiehysteresis is bouwtechnisch gezien gunstig; anders zou het vochtgehalte van hout dat blootgesteld is aan wisselende luchtvochtigheid, grotere schommelingen kennen. Dit zou resulteren in grote vormveranderingen. Schommelingen in het houtvochtgehalte doen de kruip van het hout in belangrijke mate toenemen: dit is het mechano-sorptief effect. Hierdoor verkort de tijd tot bezwijken. Hout met een oppervlakte-afwerking of gelamineerde houten staafdelen van grote afmetingen ondervinden minder schommelingen in het houtvochtgehalte.

Het houtvochtgehalte kan onder andere bepaald worden door het meten van de elektrische weerstand van het hout. De relatie tussen het houtvochtgehalte en de elektrische weerstand is voor elke houtsoort verschillend en wordt dan ook geijkt per houtsoort. Alternatieve methodes zijn de droogmethode, en de capacitieve methode (NBN EN 13183). [52]

2.6 De fysische en mechanische eigenschappen van hout

De belangrijkste fysische eigenschap van hout is de volumieke massa:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left[\frac{kg}{m^3}\right] \tag{4}$$

Met m: houtmassa (kg); V: volume van houtmassa (m^3); ρ: volumieke massa van het hout (kg/m^3).

Over het algemeen is de droge volumieke massa van hout eerder laag, ± 300 à 550 kg/m^3 ten opzichte van ± 2300 kg/m^3 voor beton en ± 1300 tot ± 2100 kg/m^3, respectievelijk voor lichte en volle baksteen [58]. Dit valt te verklaren vanuit de porositeit van het hout, waardoor het weinig weegt en een lage thermische geleidbaarheid heeft.

Door de anisotropie van hout verschillen de mechanische eigenschappen van hout naargelang de hoofdrichting. Hout is vooral nuttig in de richting evenwijdig met de vezel, omdat de vezels dan niet platgedrukt worden zoals wanneer hout belast wordt in de dwarsrichtingen. De dwarsdruksterkte van hout is niet zo goed. De druksterkte van hout evenwijdig met de vezel bedraagt slechts 50% van de treksterkte van hout evenwijdig met de vezel. Bij trek is vooral de cellulose in het hout van belang en bij druk de hemicellulose en lignine. Factoren die de mechanische eigenschappen van hout beïnvloeden, zijn het vochtgehalte, de temperatuur, de chemische samenstelling van het hout en defecten.

De sterkte van het hout wordt in enige mate beïnvloed door het *vochtgehalte*. Als gevolg van een toename van het vochtgehalte zwelt de celwand, waardoor er minder celwandmaterie per oppervlakte-éénheid overblijft. Er treedt ook een verzwakking op van de waterstofverbindingen die de celwand bijeenhouden. Onder het vezelverzadigingspunt worden de sterkte en elasticiteitsmodulus kleiner naarmate het vochtgehalte stijgt. Uit onderzoek is gebleken dat de druksterkte gevoeliger is voor het vochtgehalte in het hout dan de treksterkte (zie fig.7). De druk- en treksterkte evenwijdig met de vezelrichting veranderen respectievelijk met 5% en 2.5% ten gevolge van een vochtverandering van 1%, uitgaande van de sterkte-situatie bij een vochtgehalte van 12%. Eens het verzadigingspunt bereikt is, heeft het vocht vrijwel geen effect meer op de sterkte en stijfheid. Dit heeft te maken met vrij water in de celholtes. Schommelende vochtgehaltes kunnen leiden tot kruip. [31]

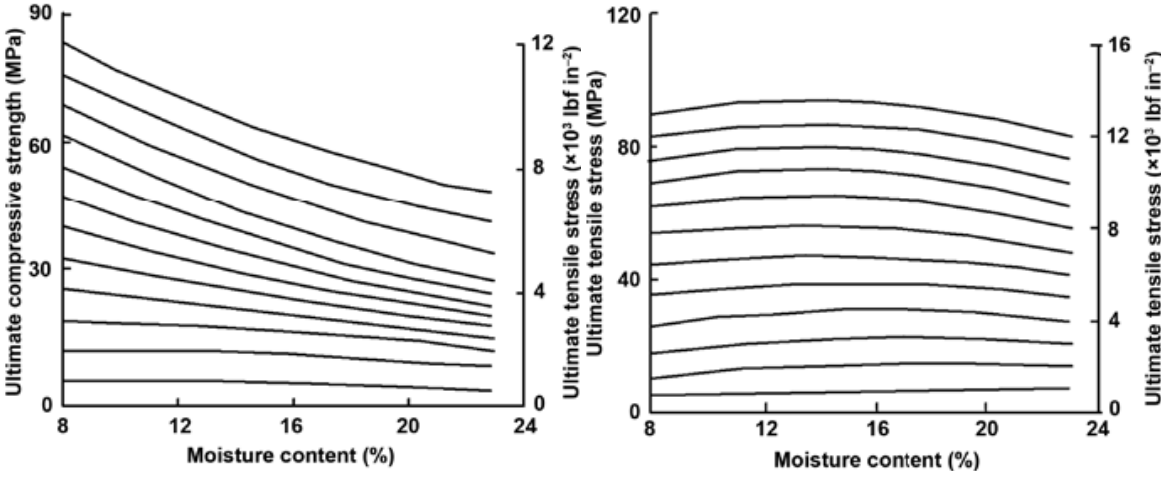


Fig 7 Invloed van het vochtgehalte op respectievelijk de druk- en treksterkte evenwijdig met de vezelrichting. [5]

De sterkte van het hout is ook afhankelijk van de *temperatuur*, maar niet in dergelijke mate als bij het vochtgehalte. Bij een daling of stijging van de temperatuur neemt de sterkte respectievelijk toe en af. De correlatie tussen de temperatuur en de sterkte is bij benadering lineair.

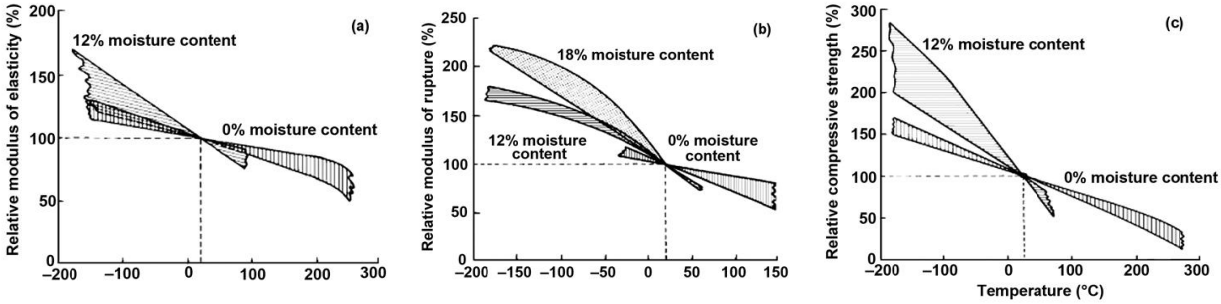


Fig 8 Ogenblikkelijk effect van de temperatuur bij twee verschillende waarden voor het vochtgehalte ten opzichte van de waarde bij 20°C voor foutvrij hout:
(a) elasticiteitsmodulus evenwijdig met de vezel; (b) buigsterkte; (c) druksterkte evenwijdig met de vezel. Op de grafiek zijn de uitkomsten van verschillende onderzoeken te zien. [5]

Wanneer een snelle afkoeling of opwarming plaatsvindt onder 100°C, is het effect op de mechanische eigenschappen van het hout nog omkeerbaar. Eens het hout terug op z'n oorspronkelijke temperatuur is, zijn de eigenschappen weer net dezelfde als voor de opwarming of afkoeling.

Bij hogere temperaturen kunnen er echter onomkeerbare effecten optreden. Deze zijn een afname van het houtmateriaal, waardoor tevens het gewicht en de sterkte afnemen. De afname hangt af van het vochtgehalte, het verwarmingsmedium, de temperatuur, de periode waarin het materiaal wordt blootgesteld, en in een bepaalde mate ook de houtsoort en de afmetingen van het houtelement. (zie ook § 3.6.3.)

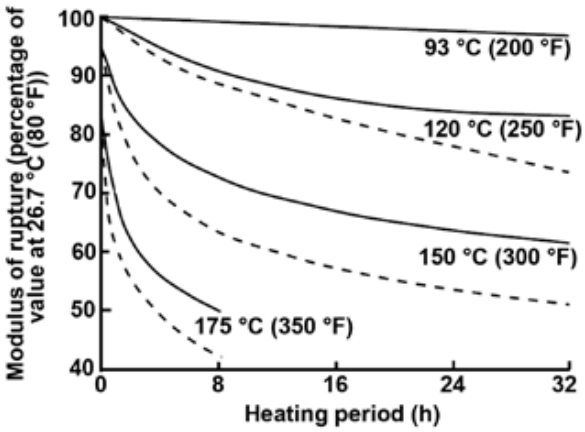


Fig 9 Blijvend effect van opwarming in water (volle lijn) en in stoom (streepjeslijn) op de buigsterkte van foutvrij hout. Alle gegevens zijn gebaseerd op proeven op Douglasspar en Sitkaspar bij kamertemperatuur. [5]

Aanwezigheid van *defecten* in het hout, zoals kwasten, kunnen variatie in sterkte en scheuren veroorzaken als ze vastzitten in het hout. Als ze loszitten, is er sterkte-verlies.

2.7 Zaagwijzen

De grootte en de manier van de vervorming, is afhankelijk van de zaagwijze en van de plaats in de stam waaruit het hout komt. Er worden verschillende zaagmethodes gebruikt: op dosse gezaagd hout, op kwartier of op half kwartier gezaagd hout. Bij dosse gezaagd hout zaagt men in de tangentiële richting. Op kwartier gezaagd hout wordt in de radiale richting gezaagd. Zuiver kwartiers gezaagd hout kan enkel uit het hartvlak (dit is volgens de diameter van de stam) komen. Indien het hout deels kwartier, deels dosse gezaagd is, spreekt men van op half kwartier gezaagd hout.

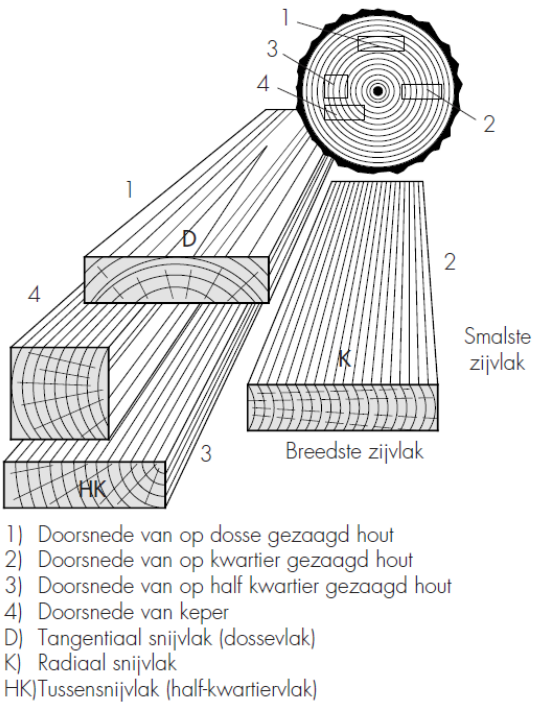


Fig 10 Zaagwijzen van hout. (WTCB, Houten vloerbedekkingen: plankenvloeren, parketten en houtfineervloeren, TV 218, december 2000, p. 33).

De planken kunnen als gevolg van een vochtverandering, gaan schotelen, kromtrekken, buigen, ... Op dosse gezaagde planken zullen steeds hol vervormen na droging. Op kwartier en half kwartier gezaagd hout doet dit niet, maar krimpt wel.

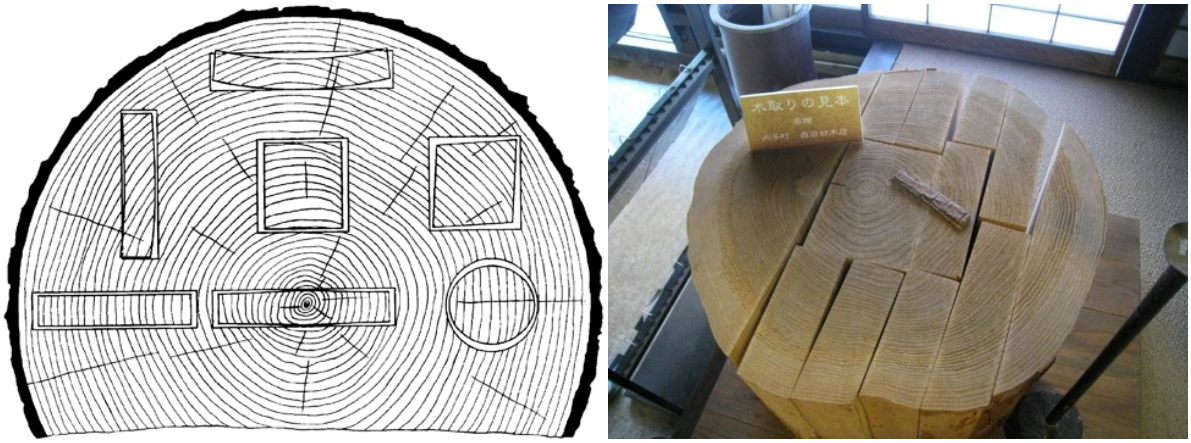


Fig 11 Karakteristieke vervorming van vierkante, rechthoekige en ronde dwarsdoorsneden na het drogen. De vervorming wordt beïnvloed door de richting van de jaarringen in het stuk hout. Tangentiale vervorming is het grootst [58]. Foto van de differentiële vervormingen na droging (Prof. Dr. Ir. Arch. Firmin Mees)

Vervormingen kunnen resulteren in schotelvorming, scheuren, vergroting of afname van afmetingen, ...

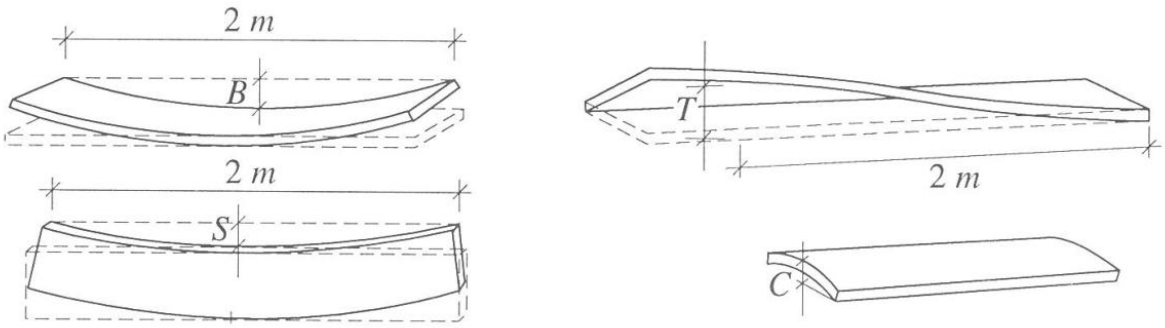


Fig 12 Verschillende soorten vervormingen: B gebogen, T scheluw, S krom, C hol [58].

Bij het drogen kan het hout scheuren door inwendige krimpspanningen. Dit gebeurt bij te grote vochtschommelingen. Scheuren zijn nadelig omdat er vocht in kan blijven staan, of omdat insecten er hun eieren in leggen, en bovendien verminderen ze vaak de sterkte. Bouwhout wordt vooraf gedroogd in een droogoven, om zo scheuren te vermijden. Tijdens stockage en transport van het hout dient men erop toe te zien dat het hout geen al te grote vochtveranderingen ondergaat. Een werf in opbouw is dan ook geen ideale omgeving om het hout te stockeren. Houten bouwdelen moeten tijdens de bouwfase continu beschermd worden tegen neerslag en andere vochtbelasting. Onafgeschermd plaatmateriaal zal vocht kunnen opnemen. Indien het nadien wordt ingesloten tussen andere bouwmaterialen, en de omgeving verwarmd wordt door het gebruik van de woning, droogt de buitenkant van de houtplaat eerst, terwijl de binnenkant nog vochtig blijft. Door de differentiële krimp zullen inwendige spanningen ontstaan in de plaat, die scheuren kunnen veroorzaken.

Een algemene regel is dat het houtvochtgehalte niet boven 20% mag liggen bij de plaatsing, tenzij het daarna voldoende kan uitdrogen. De absolute maximumgrens voor het houtvochtgehalte bij plaatsing is volgens VIBE 35% [4].

2.8 Houtaantasting

De mate van blootstelling aan weersinvloeden heeft een grote invloed op de verouderingssnelheid van het hout. Daarom is het interessant op gebied van onderhoud en op economisch vlak, om de architecturale vormgeving zo te ontwerpen dat het hout zo min mogelijk direct blootgesteld wordt.

Houtaantasting verandert het uitzicht, de chemische opbouw en de structuur van hout. De aantasting kan van biologische, fysische, mechanische en chemische aard zijn. Houtaantasting staat niet altijd gelijk aan houtschade. We spreken maar van schade als het object niet meer voldoet aan de vooropgestelde eisen. Zo vormt constructieve

schade een risico voor de stabiliteit van het gebouw, terwijl niet-constructieve schade zoals bijvoorbeeld verkleuring o.i.v. UV-straling, door niet iedereen als een schadegeval beschouwd wordt. Niet-constructieve schade is dus subjectief.

2.8.1 Atmosferische invloeden

Onder atmosferische invloeden, verstaan we de invloed van zuurstof, wind, vocht, temperatuur, zonlicht, mechanische en chemische invloeden.

Onder invloed van *UV-straling* wordt de lignine aan het oppervlak afgebroken, met als gevolg dat de cellulose wegspoelt. Het oppervlak wordt ruwer en er ontstaan kleine scheurtjes, die dieper worden naarmate het hout meer afwisselend krimpt en zwelt. Het hout wordt eerst lichtbruin, om in de tijd te verbruinen tot donkerbruin.

Onder invloed van de combinatie van *vocht* en UV-straling vergrijst het hout. De vergrijzing gebeurt door micro-organismen. Bij houten tuinmeubilair is het niet erg dat er een vergrijzing optreedt, behalve eventueel de esthetische verandering. Bij houten schrijnwerk echter kan vergrijzing ook erg schadelijk zijn. Er ontstaan scheurtjes, waarin vocht zich kan opstapelen. Indien het hout dan lang vochtig blijft, bestaat de kans op houtrot. Daarnaast verloopt vergrijzing niet onmiddellijk egaal, en is ze afhankelijk van waar het vocht aan kan.

Om de vergrijzing tegen te gaan, kunnen gepigmenteerde beitsen en verven gebruikt worden (zie hoofdstuk 3).

Aangezien hout een organisch materiaal is, doet het aan auto-oxidatie, waarbij het materiaal zowel oxidator als reductor is. Die aantasting door *zuurstof* zou normaal zeer langzaam gebeuren, ware het niet dat ze versterkt wordt door andere atmosferische invloeden, meer bepaald lichtstraling, vocht, en hoge temperaturen.

Door met de wind meegevoerde stof- en zanddeeltjes, slagregen en hagel, erodeert het oppervlak. Vooral het zachte vroeghout wordt aangetast door *mechanische* slijtage.

Sommige houtsoorten zijn zuur, waardoor ze, in aanwezigheid van vocht, een oxidatieve reactie zullen teweegbrengen op metalen die ermee in contact staan.

2.8.2 Biologische invloeden

De biologische organismen kunnen enkel voorkomen onder voor hen gunstige omstandigheden. In het buitenklimaat is vooral de schimmelaantasting een probleem. In het binnenklimaat is er ook een risico op aantasting door insecten. Indien aan één van de nodige voorwaarden niet voldaan is, dan doet de aantasting zich niet voor. Bacteriën en mariene boorders komen in dit werk niet aan bod, daar deze enkel hout aantasten onder water.

Aantasting door schimmels en insecten wordt behandeld in hoofdstuk 4 en 5. In hoofdstuk 3 wordt een definitie gegeven van de natuurlijke duurzaamheid van hout en een overzicht van verschillende verduurzamingstechnieken.

2.9 Fotosynthese

Hout is een natuurlijk product dat CO_2 opslaat en O_2 afgeeft. Door fotosynthese zetten de bladeren de toegevoerde minerale stoffen om in organisch materiaal. Via kleine openingen in het bladoppervlak dringt lucht met kooldioxide binnen. Door contact met bladgroen uit het blad wordt het mengsel van de kooldioxide, de minerale stoffen en het water omgezet in suikermoleculen onder invloed van het zonlicht. De bij de omzetting vrijkomende zuurstof wordt uitgestoten in de lucht. De CO_2 wordt door een chemisch proces gesplitst waarbij de koolstof (C) opgeslaan wordt in het organisch materiaal. Dit wordt een 'koolstofput' genoemd. De CO_2 komt bij verbranding wel terug vrij. Ook als de boom op een natuurlijke wijze doodgaat in het bos, en dus ontbindt tot zijn oorspronkelijke bouwstenen, namelijk water en koolstofdioxide, komt de CO_2 vrij in de lucht. Daardoor spreken we van de koolstofcyclus. Bij het gebruik van hout als bouwmateriaal blijft de koolstofdioxide opgeslaan in het materiaal.

2.10 Gedrag bij brand

In bijlage 1 is een beknopte uiteenzetting terug te vinden over de brandweerstand en de reactie bij brand van het materiaal hout en van houten constructies.

3. Hout als bouwmateriaal

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het gebruik van hout als bouwmateriaal. Hout kan in verschillende toepassingen gebruikt worden: gevelbekleding, constructie, afwerking, trappen, meubels, ... Als bouwmateriaal heeft het verschillende interessante eigenschappen, maar ook enkele gevoelige punten waaraan aandacht moet besteed worden. De in België gebruikte houtsoorten worden vermeld. Het gaat verder ook over de natuurlijke duurzaamheid van hout, en over verduurzamingsmethoden indien de natuurlijke duurzaamheid niet volstaat voor de toepassing, die gekenmerkt wordt door een bepaalde gebruiksklasse.

Fig 13 Houten gevel **(**Rocha Tombal Architecten Huis Bierings Utrecht); St. Felix Warehouse Antwerpen (Robbrecht en Daem); Interieur hotelkamer Lloyd Hotel (MVRDV); Interieur appartement (Robbrecht en Daem); Houtskeletbouw (Lab 15)

3.1 Vergelijking met andere bouwmaterialen.

Hout kent dan wel een eeuwenoude toepassing die blijk zou geven van de duurzaamheid van het materiaal, toch worden vaak andere materialen verkozen boven hout. Klei komt veelvuldig voor in onze bodem en is dan ook makkelijk voorhanden als bouwmateriaal. Daarnaast zijn er ook veel vooroordelen die het gebruik van hout inperken, zoals het wantrouwen tegenover brandveiligheid. Hieronder staan een paar kenmerkende verschillen met andere bouwmaterialen.

Hout is van alle bouwmaterialen de enige van nature hernieuwbare grondstof. Het is een natuurlijke en onuitputtelijke grondstof, op voorwaarde van verantwoord bosbeheer. Duurzaam bosbeheer zorgt ervoor dat een bepaalde boomsoort niet wordt uitgeroeid of uitgeput wanneer de vraag naar hout groter is dan het aanbod [4]. Er bestaan twee internationale labels die garanderen dat het gekozen hout afkomstig is van beheerde exploitaties: FSC (Forest Stewardship Council) en PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes). Bij het FSC-label wordt het hout niet alleen gecontroleerd op ecologische, maar ook op sociale aspecten. Het PEFC-label richt zich meer op de mate waarin de bossen voldoen aan de nationale criteria voor bosbeheer. Daarnaast bestaan er ook nog tal van andere labels, zoals het CSA-label (Canadian Standard Association) en het SFI-label (Sustainable Forestry Initiative).

Er dient echter een kanttekening gemaakt te worden. In België is er bijna geen houtvoorziening. Het houtaanbod dat aanwezig is in ons land, wordt overtroffen door de vraag, waardoor hout uit andere landen ingevoerd moet worden. Indien het gebruik van houtskeletbouw als bouwmethode meer en meer toeneemt, en er dus een toenemende vraag naar het materiaal hout ontstaat, groeit de milieubelasting door ontginning en transport elders. Mogelijk is het milieu-aspect dan meteen minder interessant [57].

Bij beschouwing van het eigengewicht van hout ten opzichte van bijvoorbeeld beton of staal, is hout duidelijk sterker. Het lage gewicht kan de montage van de bouwelementen op de werkplaats vereenvoudigen.

Er is echter ook een nadeel aan het lage eigengewicht verbonden: het hout heeft een lage thermische massa en kan daardoor maar weinig warmte 'vasthouden' in tegenstelling tot bijvoorbeeld beton. De thermische opslagcapaciteit of inertie van een materiaal zorgt ervoor dat het materiaal bij warmtepieken warmte kan opslaan en later geleidelijk aan weer kan afgeven, waardoor over de volledige periode een stabieler binnenklimaat heerst.

3.2 Normen, eisen en voorschriften

3.2.1 CE-markering

De normalisatie in de houtsector gebeurt hoofdzakelijk op Europees niveau, door de Europese Commissie voor Normalisatie (CEN). Men poogt Europese normen te ontwikkelen zodat men komt tot "een geheel van technische specificaties opgemaakt in samenwerking met en met de goedkeuring van alle betrokken partijen van verschillende lidstaten" [73].

De geharmoniseerde Europese normen (hEN) zijn tot stand gekomen omdat men wou dat bouwproducten makkelijker konden circuleren in de Europese lidstaten. Een bouwproduct wordt vooraleer het op de markt komt, voorzien van een CE-markering (Conformité Européenne), die aantoont dat het product voldoende presteert en overeenkomt met de op Europees vlak opgestelde normen en richtlijnen. Dit is dus niet noodzakelijk een bewijs van de kwaliteit of de oorsprong van een product. Daarnaast zijn er ook niet-geharmoniseerde normen, die niet gedekt zijn door een Europees mandaat. Het zijn desondanks belangrijke referentiedocumenten.

De CE-markering kan ook toegekend worden aan producten waarvoor het nog niet mogelijk is een geharmoniseerde norm op te stellen. Deze producten, die meestal nog maar recent ontwikkeld zijn, en waarover dus nog niet voldoende kennis bestaat, krijgen dan een toekenning door middel van de technische Europese goedkeuringsprocedure (ETA). Met vast bepaalde attesteringssystemen (AoC, Attestation of Conformity), kan men aantonen dat het product voldoet aan een geharmoniseerde Europese norm of Europese technische goedkeuring [82].

De handleiding ETAG waarmee men de ETA opstelt, geeft ook de richtlijn voor CE-markering mee. Voor houtskeletbouw-kits (ETAG 007: European Technical Approval Guideline for Timber Frame Building Kits) is een CE-markering verplicht, zo ook voor balkschoenen en voor houtachtige plaatmaterialen. Hoewel het (nog) niet verplicht is, wordt ook constructiehout vaak al gemarkeerd.

3.2.2 Technische Goedkeuring

Een ATG (Agrément Technique / Technische Goedkeuring) geeft technisch advies door middel van een beschrijving van de toepassing van een bepaald product, opdat men een goed resultaat bekomt. Het document geeft eveneens de technische eigenschappen van een bepaald product. ATG's kunnen aangevraagd worden door bouwproducten; er is geen wettelijke verplichting daartoe. Ze worden opgesteld door de BUtgb, de Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw, en dit voor producten waarvoor geen productnormen bestaan. Met deze goedkeuringsleidraad kunnen producten beoordeeld worden. Meestal bestaat daarenboven een certificatie, waarbij een gemachtigde

instelling op regelmatige basis toezicht houdt op de conformiteit van de productie en de constructie van het bouwproduct met de toegekende technische goedkeuring.

3.2.3 Technische Specificaties

De Technische Specificaties (STS) vormen een soort lastenboek dat het correct gebruik van hout en houtachtige materialen in overheidsopdrachten beschrijft. Zoals het TCHN zelf beschrijft:

> *"De STS is de vrucht van een collectieve arbeid, waarbij bouwheren en producenten in gemeenschappelijk overleg de kwalitatieve en dimensionele regels vaststellen die de grondslag vormen van hun toekomstige overeenkomsten ten bate van de belangen van elkeen, en waarbij in niet geringe mate wordt gedacht aan de verbetering van de kwaliteit en het drukken van de kostprijs van de producten".* [73]

In 2009 zijn de Belgische ééngemaakte technische specificaties over hout herzien en gepubliceerd door de Federale Overheidsdienst Economie. De documenten worden regelmatig bijgewerkt, om mee te zijn met de nieuwe mogelijkheden op het gebied van materialen, technische eisen en dergelijke.

De verschillende technische specificaties over hout, zijn de volgende: STS 04, STS 23, STS 31 en STS 52.1.

3.2.3.1 STS 04

De technische specificatie STS 04 gaat over 'Houten plaatmaterialen op basis van hout', over hout als grondstof. De nieuwe STS 04 bestaat uit vier delen:

STS 04.1 handelt over 'structuurhout', met name zaaghout dat in een constructie verwerkt wordt. De sterktesortering voor de toepassing van hout als constructiemateriaal, gebeurt naargelang de toelaatbare spanningen of breukspanningen. Elke sorteerklasse komt overeen met een weerstandsklasse. De letter 'C' wordt gebruikt voor naaldhout, 'D' voor loofhout. Het cijfer na de letter komt overeen met de karakterstieke 5% buigspanning.

Er zijn ook vier visuele sorteerklassen (S4, S6, S8 en S10) die overeenkomen met de sterkteklassen van naaldhout en populier. Andere loofhoutsoorten zijn niet beschikbaar sterktegesorteerd. Voor naaldhout worden karakteristieke waardes gedefinieerd, voor populier moet de relatie tussen sorteerklasse en weerstandsklasse aangetoond worden.

De Technische Specificatie 04.2 gaat over 'schrijnwerkhout' waarbij vooral het esthetische aspect belangrijk is. De Belgische normen zijn niet meer geldig, nu worden enkel de Europese normen gebruikt.

STS 04.3 beschrijft de 'behandelingen van het hout', meer bepaald de preventieve en curatieve behandelingen van hout tegen insecten en zwammen, evenals behandelingen voor een betere brandreactie. Dit deel legt dus de verduurzamingsmethodes uit. Naar de Europese norm worden vijf gebruiksklassen voor hout gebruikt in plaats van de vroeger gehanteerde risicoklassen.

Gebruiksklassen

De indeling in gebruiksklassen gebeurt naargelang het risico op biologische aantasting en uitloging en is dus afhankelijk van de omgevingscondities waarin het hout terecht komt.

GEBRUIKS-KLASSE (NBN EN 335)	GEBRUIKSOMGEVING	TYPISCHE VOORBEELDEN	RISICO VOOR UITLOGING
1	Hout gebruikt binnenin gebouwen in constant droge omstandigheden (luchtvochtigheid lager dan 70 %)	Binneninrichting (meubelen, lambrizering, parket) waarbij de vochtigheidsgraad van het hout permanent beneden 20 % blijft	Geen
2	Hout niet in contact met de grond en normaal niet blootgesteld aan weersinvloeden of aan uitloging Tijdelijke bevochtiging mogelijk	Timmerhout, dakgebinten, waarbij de vochtigheidsgraad van het hout occasioneel de 20 % overschrijdt Elementen in gelijmd-gelamelleerd hout, waarbij het hout occasioneel meer dan 20 % vochtigheid overschrijdt	Laag
3	Hout zonder grondcontact , blootgesteld aan weersinvloeden of condensatie	Massief hout of elementen in gelijmd- gelamelleerd hout blootgesteld aan weersinvloeden of aan condensatie	Hoog
4	Hout in permanent grondcontact Hout in permanent zoetwatercontact	Staken, palen, massief hout of elementen in gelijmd- gelamelleerd hout in grondcontact Hout ondergedompeld in zoet water Hout in koeltorens	Zeer hoog
5	Hout in zoutwatercontact	Havenconstructies, steigers, golfbrekers	Zeer hoog

Tabel 2 Gebruiksklassen van het hout (NBN EN 335)[63].

Gebruiksklasse	Insecten	Houtrot en verblauwing	Zeeorganismen
1	Hoog	-	-
2	Hoog	Wisselend	-
3	Wisselend	Hoog	-
4	Wisselend	Zeer hoog	-
5	Wisselend	Zeer hoog	hoog

Tabel 3 Biologisch risico in de verschillende gebruiksklassen (NBN EN 335)[63].

De gebruiksklasse definieert hoe groot de vochtbelasting is, en wat de gevolgen dan zijn voor de toegepaste houtsoorten. De indeling in gebruiksklassen wordt bepaald door hoe vaak en in welke mate het houtvochtgehalte het kritische vochtgehalte van 20% overschrijdt. De gebruiksklassen worden gedefinieerd in de Belgisch-Europese norm NBN-EN 335-1&2. De eerste vier gebruiksklassen geven een indicatie van hoe groot het risico op houtrot is. Toepassingen uit gebruiksklassen 1 en 2 zullen enkel door

waterdamp worden bereikt terwijl ze bij gebruiksklassen 3, 4 en 5 blootstaan aan weersomstandigheden, en dus aan rechtstreeks contact met vloeibaar water.

Houtskeletbouw is een toepassing uit gebruiksklasse 2. Door middel van constructieve ingrepen en details is het soms mogelijk om de gebruiksklasse van een houttoepassing te verlagen. Hout dat beschut is, en niet rechtstreeks in contact staat met vloeibaar water, behoort bijvoorbeeld tot gebruiksklasse 2, terwijl het anders tot gebruiksklasse 3 zou behoren.

De verwachte levensduur die samengaat met de gebruiksklassen, kan hoger of lager zijn dan de in de norm NBN-EN 460 vastgelegde verwachte levensduur van 25 jaar. Indien de houttoepassing een dragende functie betreft, is de verwachte levensduur hoger dan 25 jaar. Voor een HSB-woning is het wenselijk dat de constructie minstens een mensenleven lang meegaat. De levensduur die men ervan eist, zit tussen de 60 en 100 jaar. Iets dat eenvoudig vervangbaar is, zal dan weer een minder lange levensduur vereisen. Meubels bijvoorbeeld hoeven maar 10 à 20 jaar mee te gaan, omdat ze nogal rap gedateerd raken, erg frequent gebruikt worden en dus sneller kapot gaan, ... Erg duurzame houtsoorten gebruiken voor meubels zou dan ook onredelijk zijn. [4]

In de Duitse norm DIN 68800-2 en -3 definieert men ook een gebruiksklasse 0. Hout dat toegepast wordt in een dragende functie in deze gebruiksklasse, hoeft niet chemisch verduurzaamd te zijn. Daarvoor moet de toepassing in de andere gebruiksklassen wel aan een paar voorwaarden voldoen, onder andere wat betreft uitsluitend gebruik van kernhout, met maximaal 10% spintaandeel, bescherming door afdichting, ... waardoor een oncontroleerbare insectenaantasting onmogelijk is, en het hout voldoende kan onderworpen worden aan controle. [82]

STS 04.4 tenslotte behandelt de 'platen op basis van hout'. Hiervoor is de Europese geharmoniseerde norm van toepassing. De CE-markering – die een minimumeis is, en geen kwaliteitslabel – van de bouwproducten is verplicht. De specificatie maakt een onderscheid tussen platen in een dragende structuur en platen in een niet-dragende structuur. Daarnaast gebeurt ook een classificatie op basis van de brandreactie van de platen: er zijn platen met een natuurlijke brandreactie en platen die een verbeterde brandreactie hebben door de toevoeging van chemicaliën. Verder wordt ook aangegeven welke Europese specificaties van toepassing zijn per plaattype en gaat het over de testmethodes die gebruikt zijn om de sterkteklasse van een bepaalde plaat te bepalen op basis van het plaattype.

3.2.3.2 STS 23

STS 23 is het Belgische referentiedocument voor de houtskeletbouw. Het gaat over de toepassing van houten structuren.

3.2.3.3 STS 31

STS 31 is het vroegere nationale referentiedocument voor de dimensionering van houten constructies. De specificatie neemt de berekeningsmethodes voor timmerwerk door. Alle producten zijn onderhevig aan de CE-markering. Er worden twee methodes uiteengezet die gebruikt kunnen worden om na te gaan of het bouwwerk of onderdelen ervan wel kunnen weerstaan aan de krachten die erop uitgeoefend worden tijdens de constructie en de levensduur. De berekeningsmethode volgens de uiterste grenstoestanden werkt met de overschrijding van het draagvermogen. Er is nood aan gesorteerd materiaal: de kwalificatie gebeurt in functie van de eigenschappen van het hout. Het laatste deel van de STS bespreekt de plaatsingsvoorschriften en de brandweerstand.

3.2.3.4 STS 52.1

STS 52.1 gaat over 'houten buitenschrijnwerk', en meer bepaald over de onvolkomenheden die kunnen voorkomen in buitenschrijnwerkkaders. Er wordt een classificatie gebruikt uit de norm NBN EN 942. De ééngemaakte technische specificaties zijn uitgegeven in maart 2010.

3.3 Natuurlijke duurzaamheid en duurzaamheidsklassen

Hout wordt over het algemeen ingedeeld in duurzaamheidsklassen en daarnaast ook naargelang de weerstand tegen insecten voor de meeste houtsoorten die in Europa gebruikt worden.

De natuurlijke duurzaamheid van hout is de intrinsieke weerstand tegen aantasting van zowel schimmels als insecten en tegen verwering.

Voor de meeste houtsoorten die in Europa gebruikt worden, geldt een indeling in vijf duurzaamheidsklassen, volgens de Europese norm EN-350.1 en 2. De indeling heeft betrekking op de weerstand tegen schimmels en houtrot, niet op de weerstand tegen insecten. De weerstand tegen insecten (en termieten en mariene boorders) wordt immers op een andere manier geclassificeerd[4]. De vijf duurzaamheidsklassen gaan van

[4] Zie § 3.5

duurzaam (I) tot niet duurzaam (V). Spinthout hoort altijd thuis in duurzaamheidsklasse V, en is dus weinig duurzaam. De duurzaamheidsklassen die worden toegeschreven aan houtsoorten, zijn dus enkel van toepassing op het kernhout.

De indeling in duurzaamheidsklassen is bepaald na ervaring met de praktijk en met de hierna beschreven proef, ook wel de 'kerkhofproef' genoemd [4].

3.3.1 Kerkhofproef

Om de duurzaamheid van hout te beproeven, wordt een stekje met doorsnede-afmetingen 50x50mm deels in de grond gestopt. Hoe langer de levensduur van het kernhout in deze agressieve omgeving, hoe duurzamer het hout. Het massaverlies in de tijd wordt opgemeten, om na te gaan hoelang het duurt tot het hout vervallen is. De proef kan dus 25 jaar duren. In onderstaande tabel zijn de voor België conventionele duurzaamheidsklassen voor kernhout weergegeven.

Klasse	Duurzaamheid	Levensduur *	Voorbeelden
I	zeer duurzaam	minimaal 25 jaar	massaranduba, cumaru, ipé, robinia (I-II), angelim vermelho, pau amaralo
II	duurzaam	15 - 25 jaar	louro gamela, robinia (I-II), piquia, purperhart, sapupira, Europees eiken
III	matig duurzaam	10 - 15 jaar	guariuba, douglas, lariks (III-IV), noords grenen
IV	weinig duurzaam	5 - 10 jaar	lariks (III-IV), inlands grenen, vuren
V	niet duurzaam	maximaal 5 jaar	alle spinthout, beuken, elzen, berken

* Gemiddelde levensduur van een paaltje met afmetingen van 50 x 50 mm in grondcontact

Tabel 4: Duurzaamheidsklassen van hout [79]

De duurzaamheidsklasse van een bepaalde houtsoort garandeert dat de minimale levensduur van het hout gelijkstaat aan de overeenkomstige levensduur van de klasse. In normale omstandigheden wordt het hout niet zo zwaar belast als tijdens de proef, dus zal de levensduur van het hout in de meeste gevallen veel groter zijn dan de duurzaamheidsklasse voorspelt. Daarnaast zijn de proeven gebeurd op kleine balkjes. Hout van dezelfde houtsoort, maar met grotere afmetingen, zal dus onder normale omstandigheden waarbij het hout goed kan drogen, ook een langere levensduur halen.

Houtsoort	Natuurlijke duurzaamheids-klasse	In voortdurend contact met vochtige grond	Blootstelling aan weer en wind zonder enige bescherming	Buiten, blootgesteld aan weer en wind	Buiten onder dak
Robinia	I (-II)	/	/	150	200
Eiken	II - III	8-30	25-50	100	150
Douglas	III	15-30	40-50	65	120
Lorken (lariks)	III (-IV)	/	/	65	120
Noords grenen	III - IV	3-15	12-40	60	100
Inlands grenen	IV	3-8	12-25	/	/
Olm (iepen)	IV	/	/	100	130
Vuren	IV	3-8	12-25	55	60
Beuken	V	/	/	30	50
Essen	V	/	/	30	50
Berken	V	/	/	20	20
Populieren	V	/	/	20	20
Elzen	V	/	/	20	20

Tabel 5: In de praktijk te verwachten levensduur (in jaren) van een aantal houtsoorten in buitentoepassing met en zonder grondcontact [4].

In sommige gevallen kan de duurzaamheidsklasse van een bepaalde houtsoort niet éénduidig bepaald worden, omdat er in die houtsoort verschillen kunnen zijn tussen de bomen onderling. Eikenhout kan, zoals uit de tabel af te leiden valt, een levensduur hebben van 8 tot 30 jaar. Dit grote verschil kan verklaard worden vanuit grote verschillen in volumegewicht of houtstructuur die er kunnen zijn binnen die soort. Via de dichtheid of de hardheid van het vers gekapte hout zou men eventueel per boom afzonderlijk kunnen beoordelen tot welke duurzaamheidsklasse het hout precies behoort.

Naast de kerkhofproef zijn er nog twee testmethode volgens EN 350-1, namelijk de schimmelproef en de grondproef. Dit zijn versnelde methodes. [76]

3.3.2 Alternatieve methode voor de bepaling van de natuurlijke duurzaamheid - Edlund en Nilsson

Bij het onderzoek naar de duurzaamheid van (on)behandeld hout, werd ook een andere methode uitgetest door M.-L. Edlund en T. Nilsson die gebruik maakt van microkosmossen, als aanvulling op de klassieke veldtestmethodes met behulp van stekjes. Een microkosmos is een klein ecosysteem gebaseerd op de natuurlijke ecosystemen waarbij houtrot voorkomt. Na de blootstelling, testte men bij de verschillend behandelde stekjes het massaverlies en onderzocht men met behulp van lichtmicroscopie de eventuele aantasting door houtrot.

3.3.3 Klimaatindex van Scheffer

Om de houtdegradatie te bepalen voor houtconstructies die buiten staan en aldus blootstaan aan de invloed van het weer, kan men ook de klimaatindex van Scheffer gebruiken [18]. De index houdt vooral rekening met de impact van neerslag en temperatuur; de relatieve luchtvochtigheid en de windsnelheid spelen niet zo'n grote rol. Men gebruikt een maandgemiddelde temperatuur en neerslaghoeveelheid, omdat de combinatie belangrijk is. Men kan dus geen jaargemiddelde temperatuur gebruiken.

$$Climate\ index = \frac{\sum_{Jan.}^{Dec.}[(T-2)(D-3)]}{16.7} \tag{5}$$

Met T: gemiddelde maandelijkse luchttemperatuur (°C)

D: aantal dagen per maand met 0.2 mm (0.01inch) of meer neerslag.

De waarden voor de klimaatindex die men met de formule bekomt, tonen aan of het materiaal zich in een gunstige omgeving bevindt voor verval, dus hoezeer het neigt te rotten. Ze geven aldus een indicatie van welke en hoeveel preventieve maatregelen dienen genomen te worden. De waarden gaan van 0 tot 100 (dit wordt bereikt door te delen door de waarde 16.7), zodat men eenvoudig de vergelijking kan maken met de waarden van mogelijk verval van andere gebieden. Een waarde groter dan 65 toont bijvoorbeeld aan dat de omstandigheden bevorderlijk zijn voor houtrot, en dus een groot risico vormen; een waarde kleiner dan 35 staat voor ongunstige condities voor rot, dus een laag risico. Op basis van de gevonden waarden voor verschillende regio's kan men dan een landkaart opstellen die als referentie gebruikt kan worden. In Noord-Amerika, waarvoor de kaart is opgesteld, verandert de temperatuur en de hoeveelheid neerslag over relatief korte afstanden, zoals ondermeer in bergachtige gebieden. Indien een soortgelijke kaart opgesteld zou worden voor België, zou een kleinere schaal vermoedelijk beter geschikt zijn, omdat het klimaat niet zozeer verschilt.

3.4 Gebruiksklasse – duurzaamheidsklasse

Aan de hand van de gebruiksklasse van een bepaalde houttoepassing, kan bepaald worden welke duurzaamheidsklasse minimaal nodig is voor de houtsoort, door middel van onderstaande tabel uit de Belgisch-Europese norm NBN-EN 460 [4].

Gebruiksklasse	Duurzaamheidsklasse				
	I	II	III	IV	V
1	+	+	+	+	+
2	+	+	+	(+)	(+)
3	+	+	+	0	0
4	+	(+)	(-)	-	-
5	+	(-)	(-)	-	-

Tabel 6: Optimaal toepassen van de natuurlijke duurzaamheid van hout volgens NBN EN 460 [4].

+	De natuurlijke duurzaamheid van het hout volstaat, ongeacht de toepassing.
(+)	De natuurlijke duurzaamheid van het hout volstaat in principe. Voor bepaalde toepassingen, waarbij er een belangrijk verschil bestaat in de geschatte levensduur en de maatschappelijk verwachte levensduur, kan een verduurzamingsbehandeling aanbevolen worden.
0	De natuurlijke duurzaamheid van het hout zou moeten volstaan. Afhankelijk van de houtsoort, de permeabiliteit van het hout en de toepassing, indien er een belangrijk verschil bestaat in de geschatte levensduur en de maatschappelijk verwachte levensduur, kan een verduurzamingsbehandeling noodzakelijk zijn.
(-)	De preventieve verduurzaming van het hout wordt in principe aanbevolen. Voor bepaalde toepassingen, waarbij de geschatte levensduur voldoet aan de maatschappelijk verwachte levensduur, kan de natuurlijke duurzaamheid van het hout volstaan.
-	De preventieve verduurzaming van het hout is vereist.

Uit de tabel kan afgeleid worden dat de laagste duurzaamheidsklasse, dus met de meest duurzame houtsoorten, voor alle toepassingen kan worden gebruikt. Dit is echter niet economisch, daar de duurzamere houtsoorten ook meestal meer kosten. Men zou ook bij elke houttoepassing kunnen opteren voor weinig duurzame houtsoorten, van duurzaamheidsklasse V, die over het algemeen minder duur zijn, en die dan chemisch verduurzamen. Dit brengt echter een hoge milieu- en gezondheidsbelasting met zich mee. Wat men verder nog kan afleiden uit de tabel, is dat, hoe lager de gebruiksklasse, dus hoe minder agressief de omgeving, des te hoger de duurzaamheidsklasse mag zijn, dus hoe minder duurzaam het hout.

Welke duurzaamheidsklasse men minimaal moet nemen, is dus afhankelijk van

- De gebruiksklasse waarin het hout toegepast wordt;
- De gewenste levensduur van de toepassing;
- De houtbehandeling die eventueel wordt toegepast. [4]

3.5 Weerstand tegen insecten

Het risico op de biologische aantasting door insecten wordt, op een totaal andere wijze dan de aantasting door schimmels, geëvalueerd in de Belgische norm NBN-EN 350-2. Ofwel is het hout gevoelig voor aantasting door insecten, ofwel is het niet gevoelig, en dus duurzaam. Indien een bepaalde houtsoort gevoelig is, kan men nog een onderverdeling gaan maken tussen houtsoorten waarvan enkel het spinthout gevoelig is (S), en houtsoorten waarvan zowel het kern- als het spinthout gevoelig is (SH). De gevoeligheid voor aantasting verschilt naargelang de insectensoort. Eik bijvoorbeeld is gevoelig voor aantasting van het spinthout door de kleine klopkever en mariene boorders, matig duurzaam voor termieten, en duurzaam voor de huisboktor.

Het risico op biologische aantasting door termieten is in onze contreien zo goed als onbestaande. De evaluatie van het risico op aantasting wordt beschreven in NBN-EN 118. De resistentie tegen aantasting door mariene boorders (NBN-EN 275) wordt in deze verhandeling niet verder besproken, omdat ze in houtskeletbouw zonder grondcontact niet voorkomt.

Houtsoort	duurzaamheidsklasse				
	schimmels (kern)	houtworm-kever (spint)	boktor	termieten	mariene boorders
naaldhout					
vuren	4	SH	S	S	S
grenen	3 - 4	S	S	S	S
western red cedar	2	S	S	S	S
douglas (oregon pine)	3- 4	S	S	S	S
lariks	3 - 4	S	S	S	S
radiata pine (chili pine)	4 - 5	SH	S	S	S
hemlock	4	SH	S	S	S
Europees loofhout					
eik	2	S	D	M	S
robinia	1 - 2	S	D	D	S
tamme kastanje	2	S	D	M	S
tropisch loofhout					
basralocus	2	-	D	M	D
azobé	2	-	D	D	D
rode meranti	2 - 4	-	D	M	-
merbau	1 - 2	-	D	M	-
bilinga	1	-	D	D	M
iroko	1 - 2	-	D	D	-
manbarklak	1 - 2	-	D	-	D
walaba	1	-	D	D	-
groenhart	1	-	D	D	D
bagkirai	2	-	D	D	-

Fig 14 Duurzaamheid van een aantal houtsoorten tegen insecten (algemeen) [4]

3.6 Houtbehandeling

In dit werk wordt slechts een summier overzicht gegeven van de verschillende soorten houtbehandeling.

Hout is een natuurlijk, organisch product dat gevoelig is voor biologische aantasting door insecten en micro-organismen, zoals bacteriën en schimmels, die de polymeren lignine, cellulose en hemicellulose als voedingsbodem kunnen gebruiken. Ook de invloed van het weer (neerslag, zon en wind), temperatuurschommelingen, chemische aantasting door bijvoorbeeld pollutie, kan het oppervlak doen verweren.

Er zijn bepaalde houtsoorten die een natuurlijke duurzaamheid bezitten en dus weerstand kunnen bieden tegen deze invloeden. Meestal zijn dit tropische houtsoorten (duurzaamheidsklasse I). De meeste houtsoorten bezitten deze natuurlijke duurzaamheid evenwel niet en moeten behandeld worden om houtbederf te voorkomen. Omdat vocht een erg nadelige invloed heeft op hout op verschillende vlakken (zie ook hoofdstuk 5), is de meest effectieve manier om het hout te beschermen, het houtvochtgehalte te beheersen.

Een houtbehandeling kan gebruikt worden om het hout een ander uitzicht te geven, bijvoorbeeld door beitsen, vernissen of verven. Het kan het hout weerstand bieden tegen insecten- en schimmelaantasting, en het kan ervoor zorgen dat het houtoppervlak minder snel verweert. De houtafwerking vormt een beschermlaag op het houtoppervlak, die eventueel ook een esthetisch effect beoogt. Chemische verduurzaming kan zowel preventief[5] als curatief toegepast worden, waarbij men een biochemische stof toevoegt aan de houtmassa. Houtmodificatie kan uiteraard enkel preventief gebeuren, en zorgt voor een aanpassing van de houtstructuur.

3.6.1 Houtafwerking [4]

Een houtafwerking heeft meestal in de eerste plaats een esthetisch doel, maar kan eveneens van invloed zijn op de weerstand tegen insecten- en schimmelaantasting. Indien goed aangebracht en onderhouden, zorgt ze ervoor dat vocht minder makkelijk in de houtmassa kan binnendringen. Met het houtafwerkingsproduct worden barsten en spleten in het hout opgevuld, waardoor insecten er hun eitjes niet meer in kunnen leggen. En als het hout chemisch verduurzaamd is, kan uitlogen van het verduurzamingsproduct belemmerd worden. Wanneer de houtafwerking evenwel niet goed onderhouden wordt, kan ze een omgekeerde werking hebben, waardoor binnengedrongen vocht in de houtmassa niet meer zo snel kan uitdrogen. De regelmaat waarmee het onderhoud best gebeurt, is afhankelijk van de omgevingsvoorwaarden (zon, regen, wind, vuil en stof), het gebruik, en van het afwerkingsproduct.

[5] Preventieve verduurzamingsmethodes zijn behandelingen die ervoor zorgen dat de levensduur van minder duurzaam hout verlengd wordt.

Voor binnentoepassingen gebruikt men afwerkingsmiddelen vooral om de glans en de kleur van het hout te behouden en de mechanische weerstand (verslijten) te verbeteren. De afwerking gebeurt met olie, was, vernis, synthetische verven, vernissen en beits, of bekledingen met synthetische folie, bijvoorbeeld PVC-hars.

Indien buiten toegepast, dienen de afwerkingsmiddelen vooral om het hout te verduurzamen tegen weersinvloeden. Er zijn verschillende systemen op de markt, die al dan niet filmvormend zijn.

Het houtafwerkingsproduct wordt in vloeibare toestand in verschillende lagen aangebracht op het houtoppervlak. De eigenschappen van het product zijn aangepast aan het werken van het hout.

Een houtafwerking kan waterdicht, dampdicht of dampopen zijn. Over het algemeen geldt het volgende principe om condensatie te vermijden: de buitenzijde moet altijd meer dampopen zijn dan de binnenzijde. Hierdoor kan waterdamp in het hout uitdrogen naar buiten toe.

Lakken zoals verven en vernissen, zijn op basis van harsen en vormen een dekkend oppervlaktelaagje op het hout, dat niet in het materiaal doordringt. Door de filmvorming, kan er geen gasuitwisseling zijn tussen het houtoppervlak en de omgeving. Verven hebben een duurzaamheid van 3 à 7 jaar, vernis is duurzaam voor 1 à 4 jaar. Vernissen moeten regelmatig onderhouden worden om vochtopstapeling te voorkomen. Beitsen of lazuren gebruiken olie als bindmiddel, en dringen in de oppervlaktelaag van het materiaal. Het zijn halffilmvormende systemen. Ze zijn waterdicht, doch dampdoorlatend. Na 1 à 5 jaar moet het hout opnieuw gebeitst worden.

Onder invloed van het klimaat, verweert ook de houtafwerking. De algemene regel is dat afwerkingsproducten met kleurpigmenten beter beschermd zijn tegen UV-licht, omdat ze de UV-stralen reflecteren. Een goed dekkende verflaag garandeert bijvoorbeeld een relatief lange levensduur.

De kleur bepaalt of de oppervlaktelaag van het hout en de afwerkingslaag snel opwarmen of niet, en bijgevolg ook de vochtigheid aan het houtoppervlak, en of er barsten ontstaan.

De meeste houtafwerkingsproducten betekenen een milieubelasting. Daarom is het in sommige gevallen verantwoord voor een iets duurzamere houtsoort te kiezen, die men dan onbehandeld kan gebruiken. Voor buitenschrijnwerk is dit weliswaar niet aan te raden, omdat een aantasting meer ernstige gevolgen zou kunnen hebben dan bijvoorbeeld bij een houten gevelbekleding.

3.6.2 Chemische verduurzaming [4]

Bij chemische verduurzaming impregneert men de houtvezel met chemische, toxische stoffen, om weerstand te bieden tegen schimmels en insecten. De belangrijkste eigenschap van een chemisch verduurzamingsmiddel, is het vermogen tot vasthechting in het hout.

De chemische verduurzaming kan gebeuren met verschillende producten. Van sommige stoffen die in het verleden gebruikt werden, is aangetoond dat ze schadelijk zijn voor de gezondheid van de mens, zoals PCP (pentachloorfenol), CCA-impregnatie (koper-chroom-arseen; chroom VI en arseen zijn giftige en carcinogene stoffen), creosoot-oliën, ... Deze stoffen mogen intussen niet meer gebruikt worden voor de verduurzaming van hout. De preventieve behandeling wordt bepaald op basis van de gebruiksklasse van het hout. De behandelingen moeten uitgevoerd worden door ondernemingen die erkend zijn door de BUtgb en de producten die gebruikt worden, moeten gehomologeerd zijn door de BVHB, de Belgische Vereniging voor Houtbescherming. Heden worden in België producten op basis van creosoten gebruikt, op basis van mengzouten, maar ook solventgedragen en watergedragen actieve stoffen.

Het watergedragen impregnatiemiddel op basis van mengzouten, is een oplossing van minerale of organische zouten in water, zoals bijvoorbeeld CCB-verbindingen of recent ontwikkelde verbindingen die geen schadelijke stoffen bevatten.

Daarnaast zijn er ook producten op solventbasis, dit is een oplossing van organische, actieve stoffen in een petroleumoplosmiddel. Uiteraard zijn producten op waterbasis milieuvriendelijker dan producten op solventbasis. Vanuit milieu-overwegingen wordt de laatste tijd ook veel meer onderzoek gedaan naar alternatieve methoden voor houtverduurzaming dan een behandeling met biociden [32]. De chemische verduurzaming met bepaalde stoffen kan hergebruik als bouwmateriaal of als alternatief voor fossiele brandstoffen, onmogelijk maken [27].

Het derde type impregnatiemiddel is een watergedragen impregnatiemiddel type dispersie: dispersie of emulsie van actieve stoffen in het water, zoals verbindingen van een insecticide en fungicide met water. De watergedragen producten zorgen voor een uitzetting van het hout, die na de droging echter wel weer verdwijnt, maar die eventueel vlekken achterlaat.

Er zijn ook verschillende impregnatiemethodes. De actieve stoffen kunnen ingebracht worden door

- vacuümdruk in een autoclaaf (creosoten). Bij deze techniek wordt eerst een onderdruk op het hout gecreëerd, zodat de lucht in de cellen vermindert. Daarna plaatst men het hout in overdruk, om het middel te injecteren in de holtes. In de volgende fase wordt het hout opnieuw in onderdruk geplaatst, om te voorkomen dat het injectiemiddel niet uit de holtes lekt,

- dubbel-vacuüm techniek. Dit is een variant op de vollecel autoclaaf injectietechniek. (organische solventgedragen of watergedragen emulsies),
- oscillating of alternating pressure method (OPM of APM). Dit is eveneens een variant op de vollecel autoclaaf injectietechniek, bruikbaar bui moeilijk impregneerbaar hout.
- sproeiing,
- bestrijking,
- onderdompeling in een zogenaamde drenkingsbak, door middel van korte, halflange of lange drenking (emulsies op waterbasis en organische oplosmiddelen). [32]

De diepte waarover het hout kan geïmpregneerd worden in de massa, verschilt naargelang de houtsoort.

De chemische verduurzamingmiddelen op de Belgische markt, zijn vaak door de BVHB gehomologeerd. Dit wil zeggen dat de producten hun efficiëntie en werkzaamheid als houtbescherming in de gebruikte procédés voor de professioneel-industriële sector bewezen hebben. Naargelang het vereiste beschermingsniveau, worden de types homologatie als volgt geklasseerd:

- Timmerhout (hout met een dragende functie): A1, A2.1, A2.2, A3, A4.1, A4.2 en A5-codes. Deze categorieën staan gelijk met een 20-jarige bescherming.
- Binnenschrijnwerk (gebruiksklasse 1): de B-code wil zeggen dat men een 20-jarige bescherming kan verwachten.
- Buitenschrijnwerk (gebruiksklasse 3): de C1-code garandeert een bescherming gedurende 10 jaar; de C2- en CTOP-code garanderen een 2-jarige bescherming.
- Curatieve behandeling: homologatiecode D1 en D2 verzekeren een bescherming gedurende 10 jaar.

Vaak wil men voor de zekerheid met houtverduurzaming natuurlijke duurzaamheidsklasse 1 benaderen. Dit is niet onlogisch, daar de verhoogde verduurzaming in de praktijk enkel gehaald wordt in de oppervlakkige lagen van het hout; de kern van het materiaal is bijgevolg vaak minder duurzaam.

Men gebruikt vooral spinthout voor verduurzaming. Door onttrekking van water wordt kernhout immers ondoordringbaar. Hierdoor wordt het moeilijk impregneerbaar en is het niet zo geschikt voor verduurzamingsprocessen.

Verduurzaamd hout is te herkennen aan de groene kleur.

Fig 15 Verduurzaamd hout wordt gekenmerkt door een groene kleur

3.6.2.1 Curatieve houtbehandeling

Een curatieve houtbehandeling wordt toegepast ter bestrijding van een schimmel- of insectenaantasting op hout.

Vooreerst moet men de aard van de aantasting identificeren. De houtaantastende insecten die in onze streken het meest voorkomen, zijn de boktor, de spintkever en de boorkever of klopkever. De meest voorkomende zwammen zijn de huiszwam, de kelderzwam, het elfenbankje, het sterrenkorstje, de bruine poria, de poria vaillantii en de lenzites. Op basis van de identificatie kan men de gepaste behandeling uitzoeken. Voor de effectieve uitvoering, dient de stabiliteit van het bouwwerk verzekerd te zijn.

Meestal gebeurt dit door de injectie van pesticiden, die de aantastende organismen doden. Vaak bestaan de gebruikte producten uit dezelfde actieve stoffen als de preventieve houtbehandelingsproducten, maar dan meer geconcentreerd, waardoor ze het milieu meer belasten. De duurzaamheid wordt blijvend verhoogd. Het curatief product moet een technisch ATG-keurmerk bezitten van het type D1 voor insectenaantasting of D2 voor aantasting door schimmels en zwammen.

De insecten kunnen ook vernietigd worden door vergassing of door een verhoging van de temperatuur. Voor de curatieve bescherming plaatsvindt, dient de vochthuishouding in het gebouw hersteld te worden.

Het is van belang het hout in een bouwwerk regelmatig te controleren. De vroegtijdige opsporing van een aantasting kan de ontwikkeling namelijk inperken en dus ook de maatregelen die nadien genomen moeten worden.

3.6.3 Houtmodificatie [4] en [32]

Bij houtmodificatie brengt men wijzigingen aan in de celwandstructuur, waardoor bepaalde houteigenschappen zoals vormstabiliteit, UV- en vochtbestendigheid, hardheid en biologische duurzaamheid veranderen. Dit is de meest effectieve verduurzamings-methode.

De celwandstructuur bestaat - zoals al eerder vermeld - hoofdzakelijk uit lignine, cellulose en hemicellulose. Deze laatste twee bestanddelen bestaan voor een groot deel uit hydroxyl-groepen, en trekken aldus wateratomen aan. Door in te grijpen op de chemische structuur van cellulose en hemicellulose, kan men die hydrofiele eigenschap modificeren, en aldus het werken van het hout beperken.

De techniek biedt oplossingen voor toepassingen die anders niet denkbaar zijn, zoals bijvoorbeeld een vochtgevoelige houtsoort als badkamervloer. Het hydrofoob maken van de hydroxylgroepen, kan er ook voor zorgen dat het hout minder snel aangetast wordt door schimmels. Het hout neemt immers minder snel vocht op, door de permanente gezwollen toestand van de celwand. Hierdoor heeft het hout een lager vochtgehalte, en vormt het geen geschikte voedingsbodem meer voor schimmels. Ingrijpen op de vochtgevoeligheid, vermijdt nog een aantal problemen. Het hout vervormt minder, waardoor er vaak minder snel barsten ontstaan, met als bijkomend gevolg dat er minder snel waterinsijpeling kan ontstaan in het hout. Daarnaast zal houtafwerking trager verweren doordat het gemodificeerde hout dimensioneel stabieler is. De modificatiemethode wordt meestal gebruikt bij niet-dragende/constructieve toepassingen, en dan vooral op naaldhout (bijvoorbeeld grenen, vuren, ...). De duurzaamheidsklasse van het hout kan verhogen van IV naar I of II.

De houtmodificatie is ofwel thermisch of chemisch, of gebeurt door hydrofobering. [32]

3.6.3.1 Thermische houtmodificatie

De thermische houtmodificatie is een techniek die op zich niet nieuw is. In 1973 al had Burmester het over het FWD-proces, een afkorting voor Feuchte, Wärme en Drück [20]. Het proces is gebaseerd op de beheerste pyrolyse (dus onder afwezigheid van zuurstof) waarbij het hout in een vochtige omgeving en onder druk wordt verhit tot 200°C. Indien er wel zuurstof aanwezig zou zijn, zou het hout ontbranden, waarbij de cellulose afgebroken wordt. Bij de hittebehandeling zijn het initiële vochtgehalte en het afkoelingsproces uitermate belangrijk. Bij droging van grote houtelementen is het immers zo dat de buitenkant van het element sneller zal afkoelen dan de binnenkant, waardoor er een temperatuursgradiënt ontstaat. Hierdoor zou het hout vervormen. Een pyrolyse is eigenlijk een ontleding van moleculen. Hittebehandeld hout – ook wel geretificeerd hout genoemd – krijgt door de behandeling definitief een andere houtstructuur, die ongeschikt is als (voedings)bodem voor houtaantastende schimmels en insecten.

De verkregen houteigenschappen verschillen naargelang het gebruikte proces en medium (stoom, stikstofgas of olieën). Bij de hitte vervormen de polymeren hemicellulose en lignine, waardoor ze geen water meer kunnen opnemen. Als gevolg is het hout duurzamer en vormvaster, heeft het een ander evenwichtsvochtgehalte en een hogere massadichtheid. Het hout kleurt ook donkerder. De hittebehandeling is mogelijk op alle houtsoorten, maar is vooral geschikt voor toepassingen in gebruiksklasse 3 zoals

gevelbekleding of terrasplanken. Er zijn immers ook neveneffecten aan de behandeling waardoor ze zich minder leent tot constructieve toepassingen. Zo neemt de mechanische sterkte met 10 à 20% af door het massaverlies dat onvermijdelijk tijdens het proces optreedt, en wordt het materiaal brosser. Het verweert ook sneller ten opzichte van niet-hittebehandeld hout. Om dit tegen te gaan, kan het hout wel bijkomend behandeld worden.

Het hout kan ook thermisch behandeld worden met olie waarbij het hout ondergedompeld wordt in een bad met hete, plantaardige olie (180-220°C) om het te laten impregneren. Alhoewel ook hier de mechanische eigenschappen negatief beïnvloed worden, wordt de techniek vooral gebruikt voor de betere dimensionele stabiliteit die verkregen wordt.

Ten opzichte van chemisch behandeld hout, zijn er minder problemen voor de menselijke gezondheid, en in de afvalfase doordat er geen schadelijke chemische stoffen gebruikt zijn. Er is niettemin veel energie nodig voor het proces en het koelwater/water uit de stoomfase is verontreinigd. Het gemodificeerde hout kan ook niet meer gecomposteerd worden, aangezien door de behandeling de biologische afbraakprocessen sterk geremd zijn (dat verklaart waarom het ook niet meer aangetast kan worden door schimmels). Recyclage is wel mogelijk, en het hout mag ook verbrand worden zonder schadelijke emissies.

In België worden op de commerciële markt de volgende procédés gebruikt: Thermowood en Stellac uit Finland, Plato uit Nederland, en Perdure, Bois Rétifié en NOW uit Frankrijk.

3.6.3.2 Chemische houtmodificatie

Met behulp van chemische stoffen kan de moleculaire houtstructuur eveneens gewijzigd worden. Bij chemische verduurzaming voegt men biociden toe aan het hout. Met chemische houtmodificatie daarentegen bereikt men met behulp van actieve chemische stoffen een wijziging van de cellulose- en lignine-structuur. Chemische modificatie leent zich goed tot het verkrijgen van bijna elke gewenste verbeterde eigenschap door het juiste product toe te voegen. Door de modificatie kan het hout minder hygroscopisch gemaakt worden, waardoor het niet meer geschikt is voor aantasting door insecten en schimmels. Er zijn verschillende chemische modificatietechnieken.

De meest gebruikte techniek, is de acetylering, waarbij onder vacuüm en hoge temperaturen, acetylgroepen worden toegevoegd aan het materiaal. Hierbij worden de hydroxylgroepen vervangen door hydrofobe acetylgroepen. Voor een goede weerstand tegen schimmelaantasting en een aanzienlijke verbetering van de dimensionele stabiliteit, dient het materiaal tot in de kern behandeld te worden. De invloed op het krimp- en zwelgedrag is afhankelijk van de mate waarin het hout geacetyleerd wordt, en kan tot 80% verminderen. Hierdoor wordt de negatieve invloed op coatings verminderd,

en moeten ze minder vaak onderhouden worden. Het evenwichtsvochtgehalte van het materiaal verlaagt op een ingrijpende manier [8]. Na de behandeling behoort het hout tot duurzaamheidsklasse I. Het hout wordt dus erg duurzaam, minder vatbaar voor schimmelaantasting, vertoont minder verwering bij blootstelling aan UV-stralen, en is iets zwaarder en harder. Op de sterkte-eigenschappen heeft de methode nauwelijks invloed. De acetylering heeft geen invloed op latere mogelijke recyclage van het hout. Het afvalproduct van de acetylering, azijnzuur, kan mogelijk wel voor een grote milieubelasting zorgen.

Furfurylering is een vacuümdruk autoclaafbehandeling met thermisch hardende bio-chemicalieën of furfuryl-hars. De bio-chemicalieën zijn een afgeleide van pentose afvalsuikers uit het restafval van landbouwgewassen. Een waterverdunde harsoplossing wordt autoclaaf geïmpregneerd in het hout waarbij het furfurylhars de celwand binnendringt. Voor deze behandeling kan men enkel goed impregneerbare houtsoorten gebruiken. Na uitharding van het hars bij 130 °C, is een nieuwe polymeerstructuur ontstaan in de celwanden. Zo ontstaat een vierde polymeersoort, naast de elementaire polymeren die van nature al in het hout aanwezig zijn: lignine, cellulose en hemicellulose. De harspolymeer verstevigt en beschermt de andere polymeren, zodat die minder vatbaar zijn voor schimmelaantasting. Het uiteindelijke product is steviger, harder, heeft een betere vormstabiliteit en heeft meer weerstand tegen zuren en alkaliën. Door de furfurylatie kleurt het hout donkerder.

De chemische houtmodificatie kan ook gebeuren door middel van een minerale silificatie van de celwanden. De indrenking met kiezelzuur is niet zo diepgaand, maar verandert de houtstructuur zodat ze niet meer aangetast kan worden door schimmels. Het behandelde hout is meer brandwerend, en steviger.

3.6.3.3 Hydrofobering

Hydrofobering tenslotte, is een biocidevrije behandelingsmethode die het hout waterafstotend zou kunnen maken. Door de beheersing van het vochtgehalte, kan verval uitgesteld worden. Het hout kan gecoat worden, of de volledige celholte kan worden geïmpregneerd met een waterafstotend product, zoals koolzaadolie, lijnolie, dennenolie, synthetische harsen, siliconen, ... Deze techniek wordt in de praktijk nog niet gebruikt.

3.7 Protection by design

VIBE, en steeds meer mensen met hen, is ervan overtuigd dat hout niet altijd behandeld hoeft te worden; vroeger gebruikte men enkel onbehandeld hout. De constructie moet er dan wel zodanig naar gericht zijn dat er geen aantasting kan plaatsvinden. Dit onderwerp wordt in hoofdstuk 5 behandeld. Houtverduurzaming heeft echter ook een positieve connotatie wat betreft het milieu. Door de behandeling kan men het product immers langer gebruiken en zijn ook houtsoorten die niet van nature duurzaam zijn, toepasbaar. Hittebehandeling is meer milieuvriendelijk dan verduurzaming met pesticiden, maar vergt wel veel energie.

3.8 Gebruikte houtsoorten

De keuze van de goede houtsoort is zowel gebaseerd op subjectieve als op objectieve eisen. Objectieve eisen zijn onder meer de duurzaamheid, de hardheid, de vormvastheid, en de mechanische en fysische eigenschappen. Ook de gewenste levensduur en de gebruiksklasse zijn bepalend. Subjectieve criteria zijn het uitzicht van de kleur en de tekening van het hout, de leverbaarheid en de kostprijs.

Voor het constructiehout voor massieve houten regels en kepers gebruikt men spintvrij kernhout dat eventueel chemisch verduurzaamd is. De gebruiksklasse en duurzaamheidsklasse van het hout zullen bepalen of verduurzaming nodig is of niet. Indien het niet chemisch verduurzaamd is, heeft het hout een duurzaamheidsklasse van I, II of III.

In België worden de volgende houtsoorten voor constructiehout het meest gebruikt (volgens NBN EN 13556 en NBN EN 14081-1): Europees Douglas uit Frankrijk, Duitsland en België, Oregon Pine uit Noord-Amerika, Vuren uit België en buurlanden en Noords Vuren uit Noord-Europa, Grenen uit België en buurlanden, Noords Grenen uit Noord-Europa. Voor structurele toepassingen wordt dus meestal naaldhout gebruikt. Naaldhout is licht in verhouding tot z'n mechanische sterkte. Soms wordt ook populier gebruikt. Dit is de enige loofhoutsoort die sterktegesorteerd is. Indien er inlands hout gebruikt wordt, is dit meestal afkomstig uit Wallonië.

De stijlen en balken kunnen naast massief houten regel- en keperwerk, of timmerhout, ook vervaardigd worden uit houtachtige materialen, zoals GGH (gelijmd gelamelleerd hout), LVL (Laminated Veneer Lumber), ... [82]

LVL, vrij vertaald 'gelamineerd fineerhout', is een samengesteld verlijmd houtproduct, waarbij de draad van het hout in alle verlijmde lagen gelijkgericht is[6].

[6] Dit in tegenstelling tot triplex en multiplex, waarbij de lagen kruislings verlijmd zijn.

Fig 16 Laminated Veneer Lumber
(http://hti.renemom.nl/tabellen/2010_11_20%20houttabellenboek%20versie%201.1.pdf)

Daarnaast hoeven de secties van de houten elementen niet altijd rechthoekig te zijn. Voor een optimaal materiaalgebruik, waarbij men het meeste materiaal concentreert in de uiterste vezel, daar waar de grootste buignormaalspanningen dienen opgenomen te worden, kan men opteren voor bijvoorbeeld I-liggers. [42]

I-liggers vervangen het keperwerk en worden gebruikt voor daken, vloeren en wanden. Het zijn samengestelde houten liggers met een I-vormige doorsnede. De flenzen zijn ofwel massief houten bestanddelen ofwel van het type LVL. In het laatste geval is de houtsoort streekeigen en FSC-gelabeld. De dikte van het fineerhout varieert van 2.5, 3.2 of 4.2 mm (± 0.2 mm). De flensbreedte bij OSB bedraagt 38, 45, 58 of 89 mm. De flensbreedte bij houtvezel bedraagt 45, 60 of 90 mm. De flenzen zijn geconstitueerd als één geheel over de volledige lengte van de I-ligger. Bij I-liggers is de koudebrugwerking t.o.v.bij massief timmerwerk, erg beperkt. Over het algemeen vertonen ze erg weinig krimp. [82]

Gelamelleerde elementen bestaan uit gevingerlaste houten lamellen horizontaal vlak op elkaar gelijmd, vervaardigd volgens de voorschriften van NBN EN 386. De houtsoorten die aangewend worden, zijn naaldhoutsoorten zoals vuren, grenen, douglas, ... Al het verwerkte hout is bij voorkeur niet chemisch verduurzaamd [82].

3.9 Gedrag bij houtaantastende insecten [4] en [52]

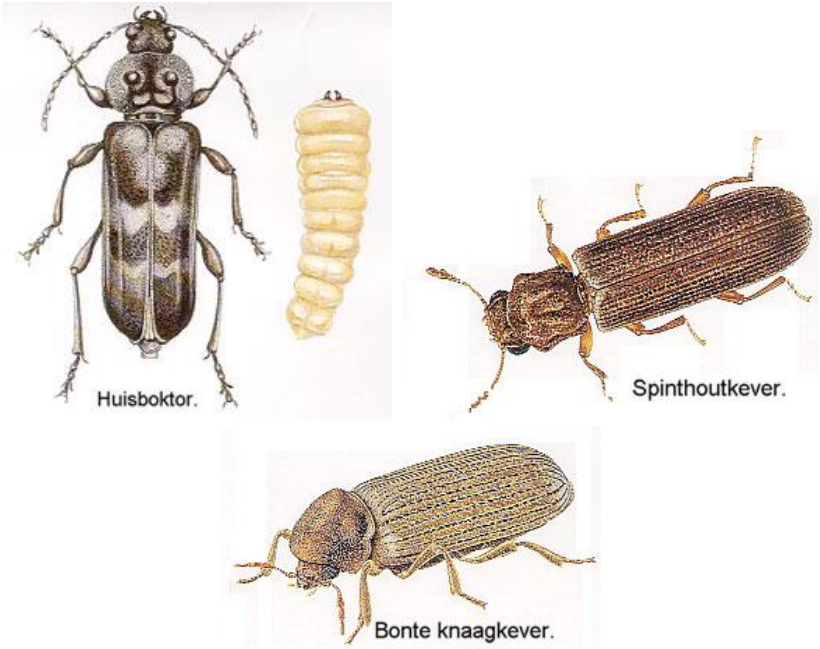


Fig 17 Huisboktor, spinthoutkever, bonte knaagkever (http://www.houtworm.com/Promomap)

De meest voorkomende aantastingen door insecten in gebouwen in België gebeuren door kevers. De belangrijkste zijn de huisboktor (in naaldhout), de spinthoutkever (in loofhout) en de klopkever (ook wel boorkever of bonte knaagkever genoemd). Dit zijn drooghoutboorders. Zoals de naam al zelf zegt, tasten de drooghoutboorders enkel droog hout aan. Daarnaast kunnen ook nathoutboorders, vlinders, wespen en termieten schade aanrichten. Normaal komen termieten in onze streken niet voor. Op zich wordt de houtschade vooral berokkend door de larven van de insecten. De larven knagen immers gangen in het hout en veroorzaken zo ernstige schade.

De volwassen wijfjes leggen eitjes in de barsten, in houtporiën en in schorsresten. Eens de larve daar ontwikkeld is, knaagt ze galerijen in het hout, dat als voedsel dient. De larve breekt de lignine uit het hout af. Na deze groeifase, baant ze zich een weg tot vlak onder het houtoppervlak, waar ze ontpopt tot een volwassen kever. Bij het uitvliegen laat ze een ovaalvormige opening achter in het oppervlak. De gangen leiden tot een massaverlies, en dus een daling van de mechanische eigenschappen van het hout. De schade wordt vaak pas laat opgemerkt, omdat de aantasting pas zichtbaar wordt als de gaatjes gemaakt worden in het oppervlak, dus na één volledige generatie van de houtkevers.

3.9.1 Voorwaarden voor insectenaantasting

Er zijn meerdere voorwaarden waaraan voldaan moet zijn vooraleer er een aantasting door insecten plaatsvindt.

Een eerste voorwaarde is de aanwezigheid van een geschikte, voor sommige insecten vochtige, *voedingsbodem*, zijnde hout. Insecten tasten niet om het even welk hout aan. Ze richten zich vooral op het zachte spinthout, omdat dat nog geen duurzame, voor insecten toxische inhoudsstoffen bevat zoals het reeds verkernde hout. Spinthout bevat wel voedingsstoffen, zoals zetmeel, suikers en andere makkelijk afbreekbare stoffen. Of een houtsoort gevoelig is voor de aantasting door een bepaalde insectensoort, is afhankelijk van de voorkeur van de insectensoort zelf, en de natuurlijke bescherming van de houtsoort. Er zijn houtsoorten met inhoudsstoffen met een toxische werking, en houtsoorten met onvoldoende voedingsstoffen om de aantasting toe te laten. De kans op aantasting door insecten in het buitenklimaat is minimaal, omdat het hout er te vochtig is.

Het hout moet gemakkelijk *bereikbaar* zijn, d.w.z. niet omhuld door schermen of isolatie, ... Kevers hebben scheuren in het hout nodig om hun eitjes in te leggen. De barsten kunnen afgeschermd worden van insecten door een verflaag of een dekkende bescherming op het hout aan te brengen. In HSB-wanden kan de houtstructuur afgeschermd worden van insecten door de dampremmende laag die ervoor komt.

Het insect heeft ook *zuurstof* nodig. Insecten komen dus niet voor in hout onder water. Uitzonderingen zijn mariene boorders, en bacteriën.

De gunstige *temperatuur* is voor elke insectensoort verschillend, maar over het algemeen moet de temperatuur zich tussen 10°C en 40°C[7] bevinden, om een normale ontwikkeling van de larven toe te laten. Hogere of lagere temperaturen leggen de ontwikkeling niet stil, maar vertragen ze wel.

[7] Dit is tevens een gunstige temperatuur voor schimmelontwikkeling.

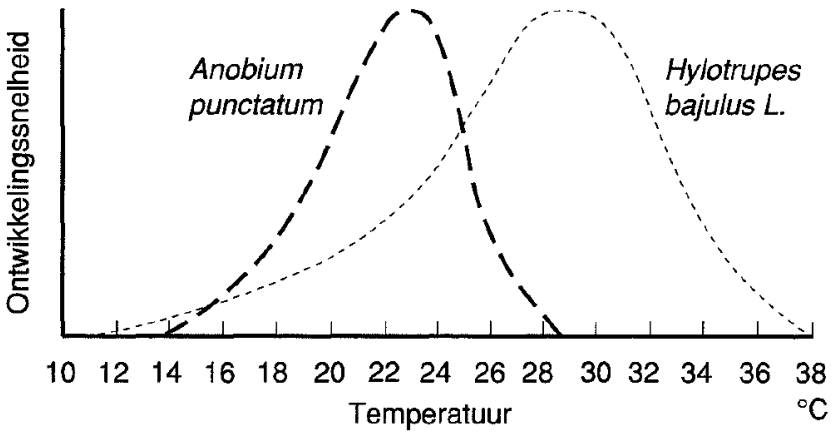


Fig 18 Relatie tussen de ontwikkeling van de larven en de temperatuur, voor de klopkever (*Anobium punctatum*) en de huisboktor (*Hylotrupes bajulus*) (WTCB, TV 180 Curatieve houtbescherming in gebouwen, 1990)

Het *houtvochtgehalte* is geen belangrijk criterium voor de ontwikkeling, maar kan de ontwikkeling van de larven wel stimuleren. Het houtvochtgehalte in ruimtes met centrale verwarming (6 à 12%), is vaak al voldoende voor de ontwikkeling van de larven.

Ook de afwezigheid van een bepaalde schadelijke stof verschilt naargelang de insectensoort.

3.9.2 Houtaantastende insecten

De huisboktor of houtboktor (*Hylotrupes bajulus*), veroorzaakt de meeste schade. Hij tast enkel naaldhout aan, en dan vooral het spinthout van kernbomen (grenen, lariks, douglas, ...), en het hout van niet-verkend naaldhout (vuren). In een verdere staat van aantasting wordt ook het kernhout aangetast. Aangezien men vooral naaldhout gebruikt voor constructieve toepassingen, is de huisboktor vooral terug te vinden in dakgebinten, en vloerdelen. Soms merkt men de aanwezigheid van de kever op door het geluid dat de knagende larven maken. Na de eerste generatie, kan men de ovale uitvliegopeningen beginnen waarnemen. Huisboktors gedijen in een warme en vochtige omgeving, maar zoeken in de praktijk eerder dakgebinten in ongebruikte zolders op. Door het dakgebinte te isoleren, of een dekkende verflaag aan te brengen op het hout, kan u de aantasting door de houtboktor grotendeels vermijden.

De spinthoutkever (*Lyctus brunneus*) tast zoals de naam al duidelijk maakt, het spinthout aan van zetmeelhoudend en wijdvatig loofhout. In houtskeletbouw komt de spinthoutkever bijna niet voor, omdat men tegenwoordig voornamelijk naaldhout gebruikt voor de constructie. De kever is vooral terug te vinden op plaatsen die van weinig constructief belang zijn, zoals meubelen, binnenschrijnwerk, multiplex en andere. Desalniettemin kan hij toch grote schade aanbrengen. De aantasting wordt

opnieuw meestal pas vastgesteld nadat de eerste generatie insecten zijn uitgevlogen. De uitvliegopeningen zijn rond, met een diameter van 1 tot 1.5mm. Soms kan men de aantasting ook detecteren door kleine hoeveelheden boormeel die van het houtoppervlak vallen. [12]

De kleine klopkever (*Anobium punctatum*), ook wel kleine houtworm, kleine boorkever of meubelkever genoemd, tast hoofdzakelijk het spint van naald- en loofhout aan. De schade gebeurt aan meubels, trappen, in zolders, en in kelders, en is meestal eerder beperkt. De aantasting wordt pas vastgesteld eens de eerste generatie de ronde uitvliegopeningen heeft verlaten, of wanneer hoopjes boormeel worden gevonden. Deze kever verkiest hout met een vochtgehalte net onder het vezelverzadigingspunt. Droog hout met een vochtgehalte onder 20% kan ook wel worden aangetast, maar dan met een kleinere snelheid. Onder een houtvochtgehalte van 12% wordt de ontwikkeling verhinderd. In normaal gebruikte, centraal verwarmde ruimten komt de kleine klopkever dan ook niet voor.

De grote klopkever (*Xestobium rufovillosum*), grote houtworm of bonte knaagkever, ontwikkelt zich in loofhout dat al aangetast is door een schimmel. De ronde uitvliegopeningen hebben een diameter van 4mm.

Naast de reeds besproken drooghoutboorders, zijn er ook nathoutboorders, die staande en vers gevelde bomen, en soms ook pas gezaagd hout aanvreten. Ze richten zich dus enkel op nat hout en komen slechts per uitzondering voor in droog hout, waaruit de voedingssappen reeds zijn verdwenen. Ze vormen dan ook slechts een klein gevaar voor houtskeletconstructies. Om deze insecten te vermijden in een verdere houttoepassing, kan men de bomen het best vellen net nadat de insecten zijn uitgevlogen, dus tijdens de wintermaanden. Een voorbeeld van een nathoutboorder is de houtwesp.

Termieten komen voornamelijk voor in warmere streken; daar worden termieten afgeremd door constructieve afschermingen zodat de termieten het constructieve houten gedeelte van het gebouw niet kunnen bereiken. In België is het risico op termieten nagenoeg onbestaande, ook al zou de temperatuur stijgen door de klimaatsveranderingen. Zelfs indien aangetast hout ongewild geïmporteerd zou worden uit andere landen, zouden termieten niet overleven in het te koude Belgische klimaat.

3.9.3 Preventieve houtbescherming tegen insecten

Eerst en vooral kan de aantasting voorkomen worden door hout te gebruiken dat niet zo gevoelig is voor aantasting door insecten en dat al een goede natuurlijke duurzaamheid bezit. Hout dat wel gevoelig is, kan verduurzaamd worden. Meer over de verduurzamingsbehandeling is terug te vinden in § 3.6.

3.9.4 Curatieve houtbescherming tegen insecten

De juiste bescherming begint met het stellen van de juiste diagnose. Men dient te achterhalen om welk insect het gaat, wat de omvang van de schade is, ... De stabiliteit dient ook verzekerd te worden, voor men start met de eigenlijke behandeling. Vooraf gebeurt ook nog diepgaand onderzoek en proefboringen. Het hele gebouw moet onderzocht worden, aangezien de houtaantastende insecten kunnen vliegen waardoor ze inmiddels ook houtelementen in andere vertrekken kunnen aangetast hebben. Eventueel dient men aangetaste delen te verwijderen.

De behandeling is niet dringend. De larven ontwikkelen zich maar langzaam en de volwassen insecten vliegen maar uit in een beperkte periode van het jaar (meestal april tot september). De verduurzamingsproducten horen aangebracht te worden op het blanke hout. De curatieve behandeling om houten elementen die aangetast zijn door larven van houtetende insecten, duurzaam te maken, zijn gebaseerd op het D1-procédé. Het procédé, dat beschreven staat in STS 04.3 [63], garandeert een preventieve bescherming tegen een nieuwe biologische aanval. De producten waarmee men de curatieve behandeling uitvoert, bezitten een ATG-keurmerk. Enkel de houten elementen in een vertrek worden behandeld, omdat de larven zich enkel kunnen ontwikkelen in hout. De D1-procédés zijn hoofdzakelijk bedoeld om de huisboktor, de spinthoutkever en de kleine en grote klopkever uit te roeien.

4. Houtskeletbouw

4.1 LCA: ecologische duurzaamheid

In tegenstelling tot vroeger, waar de focus vooral lag op het energiezuinig gebruik van gebouwen, ligt de focus nu op de algemene duurzaamheid van gebouwen over hun volledige levensduur. Deze ontwikkeling is ongetwijfeld mede tot stand gekomen door het nijpende probleem van de klimaatopwarming [57].

De duurzaamheid kan voorspeld worden door een levenscyclusanalyse (LCA) te doen: men gaat na hoe groot het materiaal- en energieverbruik is tijdens de levenscyclus van een gebouw, dus van "cradle to grave", van wieg tot graf. Men kijkt na wat bijgevolg de milieu-impact is.

LCI, life cycle inventory, is een fase van de LCA. Ze geeft een overzicht van alle energie nodig voor de productie van een gebouw, en de emissies en afval die daarbij vrijkomen. Van "cradle to gate", van de wieg tot de fabriekspoort. De LCI beschouwt het gebouw in z'n geheel, en niet de gebruikte materialen of producten zonder context, zonder randvoorwaarden van thermisch comfort en binnenluchtkwaliteit, zoals bijvoorbeeld Börjesson en Gustavsson (2000) doen [27].

In hun paper vergelijken ze het primaire energiegebruik en de uitstoot van koolstofdioxide en methaan voor eenzelfde gebouw, enerzijds in betonconstructie, anderzijds in houtconstructie. Uit de studie bleek dat het primaire energiegebruik van fossiele brandstoffen voor de houtconstructie zo'n 60 à 80% lager ligt dan bij een betonconstructie. De uitstoot van broeikasgassen is volgens hen wel afhankelijk van waar het hout na het gebruik als bouwmateriaal terecht komt: als alternatief voor fossiele brandstoffen, hergebruik als bouwmateriaal, of op een stortplaats (waarbij de opgeslagen CO_2 en CH_4 bij de afbraak van het hout langzaam vrijkomen). De hoeveelheid broeikasgassen die vrijkomt bij een betonconstructie is ongeveer van dezelfde grootte als wanneer het hout gestort wordt [8].

In haar doctoraatsstudie [57] onderzoekt Griet Verbeeck de relatie bij de LCI tussen de energie die men met lage energiegebouwen kan besparen, en de *embodied energy*, de energie nodig om het lage-energieconcept te realiseren. Aangezien het verwezenlijken van lage energiegebouwen meer materialen vergt dan gewone gebouwen[9], is het doel

[8]De onderzoekers Lenzen en Treloar gaan akkoord met de conclusie van Börjesson en Gustavsson dat de uitstoot bij een betonconstructie over het algemeen groter is dan bij een HSB-constructie, maar vinden dat ze onderschat worden met een factor 2 [38].

[9] Ook al is de ingebouwde energie door de energiebesparingsmaatregelen bij lage energiegebouwen groter dan bij gewone gebouwen, in verhouding tot de energiebesparingen die ze kunnen teweegbrengen, vormen ze geen hinderpaal. De extra isolatie die bijvoorbeeld nodig is voor lage energiegebouwen, vraagt dan wel erg veel bijkomende energie, door de energiebesparingen die men kan bereiken tijdens het gebruik van het gebouw, kan ze gecompenseerd worden in een paar jaar. [56]

van deze lage-energiegebouwen pas bereikt als de totale energiebalans positief is en blijft tijdens de levensduur van het gebouw. Er wordt onderzoek gedaan naar de impact van energiebesparende maatregelen, op bijna identieke gebouwen, die voldoen aan de hedendaagse comforteisen, telkens met het niet-geïsoleerde gebouw als referentie. Ook de impact van verschillende constructiesystemen wordt met de LCA uitgetest, waarbij in het bijzonder de verkregen resultaten voor houtskeletbouw in het kader van deze masterproef interessant zijn.

Griet Verbeeck stelt dat de veronderstellingen gedaan in verband met wat er na het gebruik van een gebouw gebeurt, bij een traditionele LCI, veel te onzeker zijn, en daarom doet ze zelf de veronderstelling van een gebruik van het gebouw door één generatie gedurende 30 à 40 jaar. Wat er na die ene generatie gebeurt, wordt niet in beschouwing genomen. Enkel de fasen grondstofwinning, productie, transport, gebruik en vervanging worden in rekening gebracht.

De 'embodied energy' van drie verschillende constructietypes werden vergeleken. Het bleek dat de embodied energy van een constructietype uit massieve baksteenmuur met isolatie aan de buitenkant, een constructietype met een spouwmuur, en een constructietype uit houtskeletbouw, vergelijkbaar was. Het verschil in primaire energiebesparingen is te wijten aan het feit dat de besparingen per constructietype telkens werden vergeleken met eenzelfde niet-geïsoleerd gebouw, behalve bij houtskeletbouw, waar de referentiesituatie een houtskeletbouw was met 8 cm minerale wol isolatie. Dit omdat de isolatie zich bij HSB tussen de stijlen van de constructie bevindt en aldus inherent is aan het constructietype.

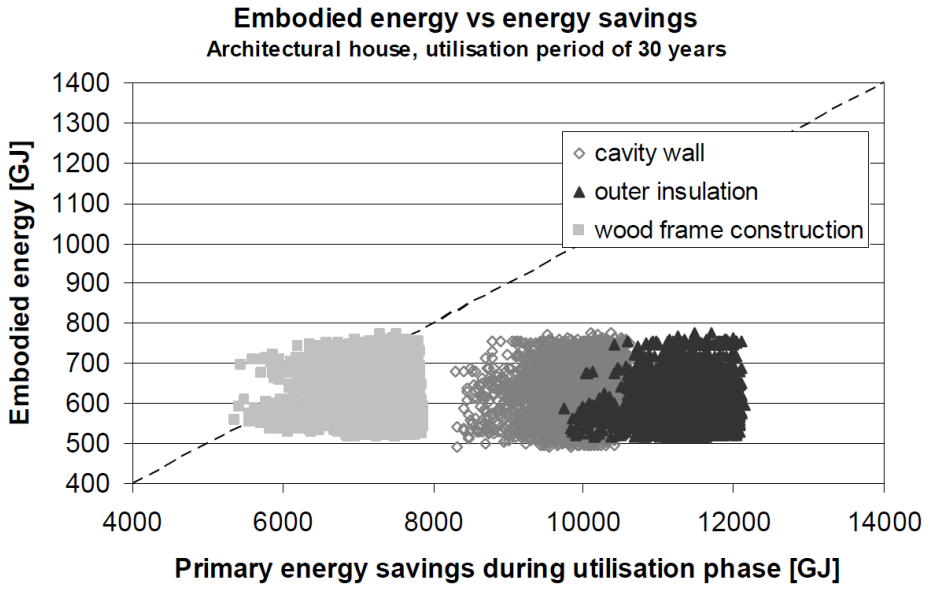


Fig 19 Architecturaal huis in het EL²EP-project van Griet Verbeeck, met een gebruiksperiode van 30 jaar. Embodied energy versus primaire energiebesparingen, vergeleken met het niet-geïsoleerde referentiehuis gedurende 30 jaar. De streepjeslijn stelt de 10%-limiet voor. [57]

Aangezien de 'embodied energy' voor de drie vergeleken bouwwijzen uit de resultaten vrijwel gelijk blijkt, kan men zich volgens Verbeeck beter toespitsen op energiebesparingen tijdens het gebruik van een gebouw.

De *global warming potential* van hout is negatief, in tegenstelling tot andere materialen, omdat hout tijdens z'n levensduur CO_2 opslaat in het materiaal [50].

4.2 Bouwtechnische duurzaamheid

De bouwtechnische duurzaamheid heeft te maken met de weerbestendigheid van een materiaal, met de kwaliteit en de lange-termijnprestatie van het materiaal.

Volgens Isaksson is duurzaamheid de capaciteit van een structuur om een vereiste prestatie te leveren gedurende een bepaalde periode o.i.v. afbreekmechanismen. Vaak wordt de duurzaamheid gecreëerd uit ervaring en door het vasthouden aan goede bouwpraktijk. Dus elke verandering van het ontwerp zal risico's inhouden. De verwachte prestatie kan haast nooit gespecifieerd worden in kwantitatieve termen [34].

Sommige duurzame elementen zijn eigen aan houtskeletbouw. Zo is het een lichte methode, die gebruik maakt van prefabricatie, en die hoofdzakelijk bestaat uit een hernieuwbare stof, namelijk hout. De duurzaamheid van houtskeletbouw kan echter nog verbeterd worden door bijvoorbeeld voor bepaalde toepassingen andere, natuurlijke materialen te gebruiken.

4.3 Houtskeletbouw in België

Fig 20 Halfvrijstaande woningen in houtskeletbouw (Sibomat, Heule)

Op basis van een WTCB-studie die in 2004 in opdracht van het Vlaams Energieagentschap gebeurde, kan verondersteld worden dat zeker 15% van de nieuwe eengezinswoningen tegen 2020 houtskeletbouw zullen toepassen [42] en [50]. Daarbij wordt verondersteld dat de marktacceptatie licht gestegen zal zijn. In de veronderstelling van een gelijk gebleven respectievelijk sterk gestegen marktacceptatie, zal het marktaandeel voor ééngezinswoningen 12 à 20% bedragen. Een sterke marktacceptatie is het meest waarschijnlijk, omdat de isolatiediktes alsmaar toenemen, en houtskeletbouw daar met het isolatie-tussen-structuurprincipe goed kan op inspelen. Houtskeletbouw is als gevolg een bouwsysteem dat zich goed leent voor passiefbouw en lage-energiegebouwen. De interesse naar de energieprestatie van gebouwen neemt ook toe. Anno 2009 was 10% van de nieuwbouw ééngezinswoningen gebaseerd op het HSB-principe, terwijl dat in 2004 nog maar 5.6% was. De toepassing in appartementsgebouwen komt echter nog maar weinig voor.

	Huidige marktsituatie	
	Eengezinswoningen	Appartementen
	huidig marktaandeel van de bouwconcepten	huidig marktaandeel van de bouwconcepten
traditioneel	87.5%	95%
houtskelet	10%	1%
bio-ecologisch	2%	0%
staalskelet	0.50%	2%
maximale recyclage	0%	0%
IFD	0%	2%

Tabel 7: Marktaandeel in 2009 van de bouwconcepten, met onderscheid tussen eengezinswoningen en appartementen. [50]

Houtskeletbouw is desondanks nog altijd een relatief onbekend bouwsysteem in België. Mensen worden nog vaak afgeremd om voor HSB te kiezen, door de vooroordelen die er bestaan. Door het feit dat hout een natuurlijk materiaal is, wordt nogal vaak gevreesd voor de brandveiligheid, en de kleine technische levensduur. Er wordt ook vaak gezegd dat HSB een slechte akoestiek heeft. Daarnaast wordt de Belg spreekwoordelijk geboren met een baksteen in zijn maag. De baksteen is een grondstof die goed beschikbaar is en aangepast is aan het Belgische klimaat door zijn toepassing in de spouwmuur.

Houtskeletbouw wordt al sinds de 18e eeuw gebruikt, maar dan vooral in bosrijke streken waar timmerhout erg voorradig is, zoals Canada, de VS, Scandinavië, waar houtskeletbouw zelfs de traditionele bouwmethode is, of in streken waar de ondergrond een beperkte draagkracht heeft, zoals in Nederland.

Om de vooroordelen te ontkrachten, is het belangrijk om kennis vergaren. De informatie over de uitvoering van HSB wordt gaandeweg aangepast aan de hedendaagse nieuwe bouwmethode, met het gewenste comfort. Een aantal basisdocumenten worden reeds

vernieuwd omdat ze niet meer conform zijn met de Europese eisen, en dan vooral Eurocode 5 (over ontwerp en berekening van houtconstructies). Zo worden bijvoorbeeld de STS'en voor hout geüpdate, Technische Goedkeuringen, ... Er wordt ook een werkdocument opgesteld met technische details en tabellen die architecten en aannemers kunnen gebruiken. Daarnaast worden onder andere ook nieuwe verduurzamings- en modificatiemethoden uitgetest, ...

Mogelijke toepassingen van HSB in Vlaanderen zijn nieuwe en te renoveren gebouwen:

- Eengezinswoningen: open en halfopen bebouwing, minder voor rijwoningen;
- Appartementen: laag tot middelhoog (rijwoningen en appartementen in HSB komen niet zo vaak voor omwille van de hoge eisen voor brandweerstand);
- Renovatie: uitbreiding of extra verdieping op bestaande gebouwen [50].

In België komen appartementsgebouwen voor tot 4 verdiepingen, terwijl men in het buitenland ook al HSB gebruikt voor gebouwen met 6 verdiepingen. Belangrijk is de dwarse stijfheid in detail te berekenen, vooral bij hoge gebouwen met weinig binnenmuren. Bij het WTCB is er een onderzoeksproject lopende voor meer kennis over de toepassing van HSB in meerlagige gebouwen.

4.4 Houtskeletbouw: systeem

Door de inherente kwetsbaarheid van hout, is het erg belangrijk om het materiaal op een juiste manier te gebruiken. Pas op die manier kan houtskeletbouw concurreren met andere bouwsystemen. Kennis vergaren is nodig. Deze paper behandelt de goede uitvoeringspraktijk voor houtskeletbouw.

4.4.1 Normen, eisen en voorschriften

De CE-markering voor een HSB-pakket houdt in dat de aangegeven prestaties overeenstemmen met de ETA, dat de elementen daarnaast ook voldoende onderworpen zijn aan evaluatie, volgens beschreven methoden, en dat de waarden aangegeven in de ETA, conform zijn met de belgische reglementering en specifieke eisen. [82]

Naast de normen zijn er ook een aantal voorschriften. De rekenregels voor houten structuren zijn samengebracht in Eurocode 5, ter vervanging van de nationale referentiedocumenten. Ze worden door ingenieurs gebruikt om houten constructies te dimensioneren.

4.4.2 Definitie houtskeletbouw

Houtbouw is een bouwmethode waarbij de dragende structuur uit hout vervaardigd is. Zowel houtmassiefbouw als houtskeletbouw kunnen tot de houtbouw gerekend worden.

Houtmassiefbouw is een stapelmethode van geprofileerde balken, waarbij de belastingsrichting loodrecht staat op de as (en dus op de vezels) van het hout. Er zijn geen verticale structuurelementen.

Bij houtskeletbouw bestaat de draagstructuur van wanden, vloeren en daken hoofdzakelijk uit een houten raamwerk van stijlen en regels, en van hout afgeleide materialen.

Bij de houtmassiefbouwmethode is er een reëel risico op zettingen en is de krimp veel groter ten opzichte van die bij houtskeletbouw (een aantal cm ten opzichte van 7 mm per verdieping). Dit komt omdat de radiale en tangentiële krimp respectievelijk zo'n 15 en 30 keer groter zijn dan de longitudinale/axiale krimp. De krimp bij houtskeletbouw kan nog verder beperkt worden door het gebruik van LVL en OSB. De krimp situeert zich in de boven- en onderregel, balken, stel- en koppelregel. In de praktijk houdt men vanaf twee verdiepingen rekening met de krimp.

Er zijn twee veel voorkomende bouwwijzen van HSB: de platformbouwmethode en de balloonbouwmethode. Beide bevatten schijfvormige constructiedelen. Het verschil tussen de balloonbouwmethode en de platformbouwmethode is vooral terug te vinden in de vloer-wandaansluiting. Daarnaast zijn er ook nog de 'braced-frame'- en de 'post and beam'-methode, maar die worden hier niet besproken omdat ze verouderd zijn.

De platformbouwmethode wordt gekenmerkt door verdiepingshoge wanden waarbij de vloer opgelegd wordt op de wandregels van de verdieping eronder. Alles wordt per niveau uitgewerkt: eerst de vloer, dan de wanden, dan het plafond, ... Dit heeft als voordeel dat er altijd een werkvloer is om op verder te werken. Er is een strikte scheiding tussen het vloerpakket en de wandstructuur.

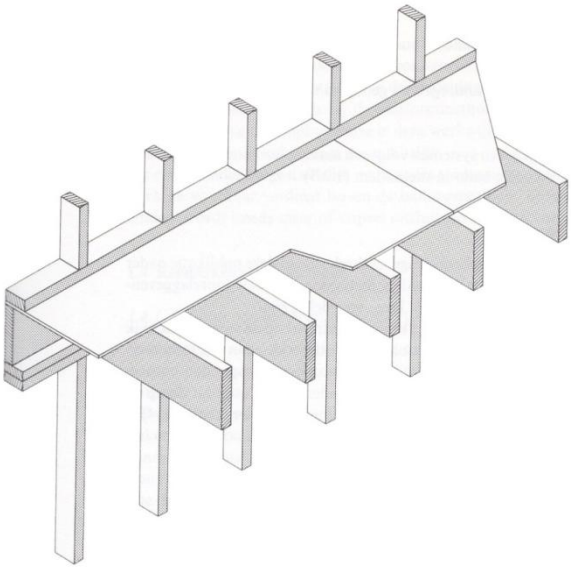


Fig 21 Vereenvoudigde vloer-wandverbinding volgens de platformbouwmethode [6]; foto van woning volgens platformbouwmethode (Lab 15)

Bij de balloonbouwmethode lopen de wandstijlen door van de fundering tot de dakrand zonder onderbreking, en kunnen we dus niet meer spreken van verdiepingshoge wanden. Het voordeel hierbij is dat het warmtetransport ter hoogte van tussenvloeren niet zo groot is als bij de platformbouwmethode, omdat de isolatie in de wand kan doorlopen. Ook de luchtdichting wordt bij die bouwknoop eenvoudiger gerealiseerd, om dezelfde reden. Deze bouwmethode heeft dus belangrijke hygrothermische voordelen ten opzichte van de platformbouwmethode. De vloerbalken worden opgelegd op de draagregels van de wand en genageld tussen de stijlen. De stijlen worden ofwel ingekeept om de draagregels te ondersteunen, ofwel worden ze opgelegd op een steunbalk, ofwel worden metalen schoenen aan de muurstijlen bevestigd om de vloerbalken te dragen. De vloerbalken van de tussenvloeren 'zweven' dan tussen de muurstijlen.

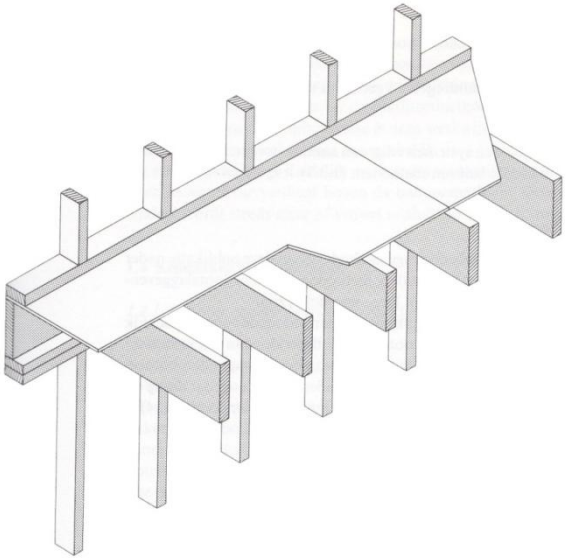


Fig 22 Vereenvoudigde vloer-wandverbinding volgens de balloonbouwmethode [6]; foto van woning volgens balloonbouwmethode (Lab 15)

Daarnaast zijn er ook combinaties van de balloon- en platformbouwmethode. De balloonmethode is het oudst, maar de platformbouwmethode heeft ten opzichte van de balloonmethode een aantal doorslaggevende voordelen. Zo is er minder hinder van krimpverschillen en zijn de verschillende elementen makkelijker te prefabriceren doordat men werkt met kleinere afmetingen[10]. De plaats van de vloerbalken is vrij omdat er geen stijlen in de weg zitten. Er zou een betere overdracht van de schuifkrachten mogelijk zijn [19]. Sommige houtskeletbouw-aannemers gebruiken de platformbouwmethode, andere prefereren de balloonbouwmethode, en nog andere gebruiken de twee. Omdat de platformbouwmethode toch nog iets meer gebruikt lijkt te

[10] De constructie bij de balloonbouwmethode kan bestaan uit massieve balken, ofwel uit lichte, van hout afgeleide/samengestelde balken. De massieve balken zijn uiteraard moeilijker te hanteren dan de constructiebalken gebruikt bij de platformbouwmethode, door hun afmetingen en gewicht, maar hierop vormen de afgeleide of samengestelde balken al een goed alternatief.

zijn in België, zullen we het vanaf nu in dit werk enkel nog over de platformbouwmethode hebben.

4.4.3 Algemene opbouw [6]

De opbouw van de draagstructuur en de afwerking van een HSB kan volledig op de werf gebeuren, ofwel kan een deel of het geheel van de draagstructuur geprefabriceerd worden in een atelier. Indien de wand- of dakpakketten volledig worden afgewerkt vooraleer ze op de bouwplaats aankomen, spreekt men over gesloten elementen. Zo zijn bijvoorbeeld elektriciteitsdozen en –leidingen bij aankomst op de werf, al voorzien. Hiervoor is het meeste voorbereidend werk en de meeste vakkennis vereist. De gesloten elementen worden bevestigd op de bouwplaats vanaf de buitenkant van het bouwwerk met houtdraadbouten.

Een open element is een wanddeel dat reeds opgebouwd is uit het stijl- en regelwerk, maar waarop de verdere afwerking nog niet is gebeurd. Dit systeem wordt tegenwoordig niet meer zo vaak toegepast, omdat het nog veel werk op de bouwplaats vergt, en dit in vaak minder gunstige werkomstandigheden dan in het atelier.

Halfopen elementen zijn een tussenvorm tussen open en gesloten elementen. De constructie-elementen zijn nog open aan de binnenkant, waardoor er aan die kant nog eenvoudig verbindingen met andere elementen kunnen gerealiseerd worden. Raam- en deurkozijnen, gevelbekleding, ... zijn al in het atelier aangebracht. Dit zorgt ervoor dat het gebouw meteen wind- en waterdicht is als de elementen op de bouwplaats aan mekaar geschakeld worden. Open en halfopen wandelementen worden op de bouwplaats vanaf de binnenzijde van het bouwwerk bevestigd met draadnagels.

De algemene opbouw van de dragende wanden bestaat uit een raamwerk van verticale houten stijlen en horizontale regels, dat zowel langs de binnen- als de buitenzijde bedekt wordt met plaatmateriaal. De holten tussen de elementen van het houtskelet worden opgevuld met thermisch en/of akoestisch isolatiemateriaal. De binnenafwerking gebeurt meestal met gipskartonplaten of gipsvezelplaten. De buitenafwerking is vrij te kiezen.

De verdiepingsvloeren zijn opgebouwd uit een houten roostering. Dit fungeert als een stijve plaat door de bevestiging van houten plaatmateriaal op de roostering en door houten klossen tussen de balken. Eventueel kan tussen de roostering ook thermische en/of akoestische isolatie geplaatst worden. Aan de onderzijde werkt men de roostering af met een plaatmateriaal, bv. gipskartonplaat. Aan de bovenzijde voorziet men vaak een zwevende vloer (dit om geluidsoverdracht te beperken).

Het hellend dak wordt geconstrueerd met houten gordingen en kepers of uit spanten. Een plat dak heeft dezelfde constructie als een verdiepingsvloer.

4.4.3.1 Gebruikte materialen: isolatie [82]

Men dient ervoor te zorgen dat de isolatie van de gehele constructie een onafgebroken geheel vormt. Doorboringen moet men dus zoveel mogelijk vermijden. Koudebruggen zijn te vermijden, enerzijds om de warmteverliezen te beperken, en anderzijds om condensatie op het koude binnenoppervlak te voorkomen. De isolatieplaten moeten goed tegen elkaar en tegen de structuur aansluiten, opdat kieren vermeden worden. Bij het aanbrengen van meerdere lagen isolatie, schrankt men best de platen, om doorlopende naden te vermijden. Eventueel worden de naden nog eens lucht- en winddicht afgekleefd. Bij de opslag en het aanbrengen van de isolatie op de bouwplaats, mag de isolatie in geen geval nat worden.

Voor de isolatie, kunnen gebruikt worden:

- Harde isolatieplaten: de afmetingen zijn zo groot mogelijk (zodat je dus minder naden hebt). Ze worden in halfsteens verband geplaatst.
    - Fenol (PF), PUR, XPS, EPS, PIR, geëxpandeerde kurk, cellenglas. Omdat dit door de dichte celstructuur meestal dampdichte isolatiematerialen zijn, is het niet aangewezen ze aan de buitenzijde van de HSB-wand aan te brengen, omdat dan het principe 'dampopen naar buiten toe', niet meer geldt. Van bepaalde van deze isolatiematerialen strookt de grootte van de milieubelasting mogelijk ook niet met het concept van een milieuvriendelijke laag-energie- of passiefwoning.
- Zachte isolatieplaten of matten: de afmetingen zijn opnieuw iets te groot, ongeveer 1 cm, (zodat ze goed aansluiten op andere isolatieplaten of de structuur).
    - Glaswol, rotswol, hennep, houtvezel, cellulose, schapenwol, veren- of vlasisolatie
- Isolatiekorrels, vlokken of schuimen: deze isolatiematerialen worden in gesloten bouwdelen ingespoten of ingeblazen onder een bepaalde druk, met de benodigde apparatuur door gespecialiseerde firma's. Met een thermografische camera wordt de dichtheid en continuiteit van de isolatie gecontroleerd.
    - PUR-schuim, cellulosevlokken, minerale wolvlokken, silicaatkorrels, geëxpandeerde polystyreenschuimparels, kurkkorrels.

4.4.3.2 De luchtdichtheid - dampremmende laag [82]

De luchtdichtheid van een gebouw heeft belang voor de beperking van het energieverbruik en om het gebruikscomfort te verzekeren. Ze verhindert een luchtdoorgang door het geheel van binnen naar buiten of omgekeerd. Daarnaast wordt ook de luchtrotatie rondom en doorheen de isolerende laag uitgesloten.

Bovendien kunnen ongecontroleerde luchtlekken de goede, geregelde werking van de ventilatie verstoren. Tenslotte hebben ze ook hun invloed op de akoestische isolatie van de schil.
Luchtdichting doet vaak tegelijk dienst als dampremmende laag. Voor een goede vochtregulering, dient men bij lichte houtconstructies een dampscherm/ dampremmende laag aan de warme zijde van de isolatie te plaatsen, in combinatie met een dampopen bekleding aan de koude zijde van de isolatie. De dikte van de dampremmende/dampdichte folie is relevant voor de resistentie tegen beschadiging, en bedraagt minimaal 0.15 mm. Het dampdiffusieweerstandsgetal μ geeft aan in welke mate de folie weerstand biedt tegen dampdiffusie, en hoeveel keer de dampdiffusieweerstand groter is dan die van een luchtlaag met dezelfde dikte.

Een dampscherm voorkomt dat waterdamp door interne vochtproductie zoals koken, wassen, kuisen, ... zou doordringen in de isolatielaag en de constructie, om te voorkomen dat zich inwendige condensatie zou voordoen in de isolatielaag. Het voorkomen van tocht en convectiestromen als gevolg van luchtlekken, zal de warmteverliezen, evenals het risico op bouwschade als gevolg van condensatie, tot een minimum herleiden. Alle mogelijke kieren, gaten en andere openingen waardoor ongecontroleerd lucht kan circuleren, dienen te worden uitgesloten. Daartoe is het nodig dat men alle naden en mogelijk opgetreden scheuren, zorgvuldig afkleeft met een daartoe geschikte kleefband. Zo moet de luchtdichte damprem van een dak of wand bijvoorbeeld continu doorlopen in de luchtdichting van andere bouw-onderdelen van de buitenschil, zoals de vloerplaat of het schrijnwerk.

Van bij het begin van het project moet men rekening houden met de bouwvolgorde, om de continuïteit van de luchtdichtheid te verzekeren door tijdig de nodige wachtfolies aan te brengen.

De dampremmende folie mag niet onnodig geperforeerd worden. Leidingen die de damprem moeten doorboren, bijvoorbeeld leidingen die van buitenshuis komen, moeten met luchtdichtingsmanchetten aan de binnenzijde bevestigd worden. Er zijn kabelmanchetten en buismanchetten, met of zonder geïntegreerde kleefstrook. Indien zonder, moet de luchtdichtingsmanchet met kleefband bevestigd worden. Een leidingspouw tussen de dampremmende laag en de binnenafwerking, vermijdt doorboringen, ook nadien wanneer er bijvoorbeeld een extra wandcontactdoos geplaatst wordt.

Fig 23 Luchtdichtingsmanchetten (Pro Clima)

Waar de damprembanen overlappen, worden ze met kleefband of luchtdichtingslijm dampdicht aan elkaar bevestigd. Om de luchtdichtheid te verzekeren, moet men een overlap van 2 cm laten langs de naad. De banen zelf overlappen minimaal 8cm. De luchtdichtingslijm wordt in een continue streng aangebracht. De kleefbanden en de lijmen dienen enkel om de luchtdichting te realiseren; de nietjes en montagelatten nemen de mechanische krachten op.

Het initieel vochtgehalte in materialen door de bouw, bijvoorbeeld door de chape, of door pleisterwerk, moet snel verwijderd worden door het lokaal te verluchten. De relatieve vochtigheid moet onder 75% blijven, zeker in de winter. Indien nodig, kan men bouwdrogers gebruiken.

Bij toepassing van een damprem bij een constructie met een dampdichte buitenkant, zoals een plat dak, moet de dakvloer, zeker bij het gebruik van houtafgeleide platen, droog gehouden worden. De damprem moet samen met de isolatie geplaatst worden. Want, eens de isolatie aangebracht is, en er nog geen dampremmende laag is, is er in de winter risico op condensatie.

De luchtdichting wordt uitgevoerd na de ruwbouwfase, en voor de afwerkingsfase (zo kunnen eventuele correcties nog worden uitgevoerd). Ze wordt best in één keer aangebracht, om - indien het een folie betreft - beschadiging te voorkomen. De kwaliteit van de luchtdichtheid kan gecontroleerd worden met een pressurisatie- of luchtdichtingstest. Door middel van een ventilator, ingebouwd in een deur- of raamopening, wordt eerst een overdruk en daarna een onderdruk gecreëerd, om een beeld te krijgen van de luchtverplaatsing die zich bij over- of onderdruk door kieren en spleten voordoet.

Voor de dampremmende laag, kan men de volgende materialen gebruiken:

- Gewapende damprem uit kraftpapier, verkleefd met PE en met glasvezelwapening.
- Vochtgestuurde of intelligente damprem. PE-copolymeermembraan en PP-vlies. Deze dampremmende laag speelt met haar variabele µd-waarde (0.25 - >10m) in op de vochtomstandigheden in de omgeving en verhoogt de dampopenheid wanneer er droge omstandigheden heersen, zoals in de zomer.

De dampremmende laag moet met de juiste zijde naar de binnenruimte gekeerd worden. De baan mag niet te strak aangespannen worden, om wat speling te laten voor beweging onder invloed van vocht. De dampremmende laag wordt bevestigd met nieten, met een onderlinge afstand van maximaal 15cm. Daarna worden de naden onmiddellijk luchtdicht afgekleefd met de kleefband of de luchtdichtingslijm. Indien men de dampremmende laag verticaal aanbrengt, dient de naad tussen twee banen steeds op een wand- of dakconstructie-element te liggen. Bij een horizontale aanbrenging, dient de naad op een horizontaal aangebrachte montagelat te rusten. Bij een gordingdak hoeft dit niet, omdat de naad daar kan voorzien worden ter hoogte van de gordingen, maar dit enkel als de tussenafstand h.o.h. kleiner is dan 1.5m. Indien dit niet het geval is, moet men de damprem verticaal plaatsen. De dampremmende laag kan bovenop of onder de bepleistering van de aangrenzende wand aangebracht worden.

De montagelatten worden aangebracht aan de binnenzijde van de dak- of wandstructuur, op de luchtdichting. Hierop zal later de afwerking, bijvoorbeeld gipskartonplaten, komen. Door de dwarslatten ontstaat een leidingspouw, die vermijdt dat leidingen de luchtdichting telkens moeten doorboren. Indien isolatie ingeblazen wordt in de leidingspouw, dienen de montagelatten eveneens als ondersteuning. De afstand h.o.h. tussen de montagelatten, is maximaal 50cm.

Bij een zogenaamd 'Sarking dak' wordt de dakisolatie bovenop de dakstructuur gelegd. Aan de buitenzijde van de dakstructuur wordt een damprem aangebracht op een continue ondergrond (bv. massieve houten planken). De luchtdicht aangebrachte damprem moet ondermeer warmteverliezen via luchtlekken verhinderen en de constructie vrijwaren van bouwschade t.g.v. condensatievocht. De dampremmende laag wordt mechanisch bevestigd met nieten, met een maximale tussenafstand van 15cm. Daarna worden de banen onderling één voor één verkleefd met dubbelzijdige kleefband. Eventueel kan men ook gewoon universele kleefband gebruiken. Op een ruwe ondergrond mag men geen kleefband gebruiken, maar luchtdichtingslijm, in een continue streng. Een alternatief is om een damprem te gebruiken met een geïntegreerde kleefstrook, zodat er geen lijm of kleefband hoeft voorzien te worden.

Voor de aansluiting met dakvensters, moet de damprem in het dakoppervlak voldoende breed oversteken, zodat ze vanbinnen met een strook dampmembraan aan het raamkozijn kan worden bevestigd. De aansluiting op het raamkozijn gebeurt met geprofileerde kleefband.

Dampdichte aansluiting houtderivaatplaten.

De naden tussen gladde houtderivaatplaten worden aan de binnenzijde van de HSB-wand luchtdicht gemaakt met kleefband uit gesiliconiseerd kraftpapier. Bij gladde houtderivaatplaten worden de naden overplakt met stroken damprem door middel van luchtdichtingslijm of natuurlatexlijm. De houtderivaatplaten zijn op zich voldoende luchtdicht. Indien er een aansluiting is tussen een dampremmende PE-folie en de

houtderivaatplaten, gebruikt men een luchtdichte lijm/natuurlatexlijm met een permanente elasticiteit, of een (universele) kleefband.

Fig 24 Luchtdichte aansluiting houtderivaatplaten (Lab 15)

Luchtdichte aansluiting tussen betonplaat en HSB-wand.
De stroken damprem worden aangebracht vóór het plaatsen van de binnenwanden, vloerisolatie en chape. De betonplaat moet voldoende droog-, stof-, vet- en siliconenvrij zijn. De stroken damprem worden met de luchtdichtingslijm op de betonplaat gekleefd. De overlappingen van de damprembanen worden afgekleefd met (universele) kleefband. De stroken worden daarna luchtdicht op de HSB-wand gekleefd met universele kleefband of luchtdichtingslijm. Ook dat oppervlak moet droog-, stof-, vet- en siliconenvrij zijn. Indien de dampremmende laag luchtdicht verkleefd wordt aan de onderzijde van een raamkader, gebeurt dat met geprofileerde kleefband.

Voor een luchtdichte aansluiting tussen de betonplaat en pleisterwerk kan men doen met een inpleisterbare aansluitstrook, die tussen de dampremmende laag en het pleisterwerk komt. Deze bestaat uit een 3-lagig luchtdicht vlies uit polyester en gelatexeerde glasvezelwapening. De stroken damprem worden aangebracht vóór het plaatsen van de binnenwanden. De aansluitstrook wordt op de randen van de stroken damprem gekleefd, en wordt dan mee ingepleisterd, met pleister boven en onder de aansluitstrook.

Men kan de luchtdichting ook aanbrengen nadat de wand bepleisterd is. Men moet wachten tot het pleisterwerk voldoende droog is (min. 14 dagen), en dan kan men de stroken damprem luchtdicht met luchtdichtingslijm op het pleisterwerk kleven. De luchtdicht gekleefde aansluiting wordt dan weggewerkt achter de later te plaatsen plint.

Luchtdichte aansluiting tussen dampremmende laag en dakraam.
De dampremmende laag wordt tot tegen het kader van het dakraam geplaatst. De aansluiting gebeurt door middel van een speciaal geprofileerde kleefband, die in de uitsparing van het dakraam voor de binnenafwerking gekleefd wordt.

Luchtdichte aansluiting tussen dak en HSB-wand.
Voor het luchtdicht maken van de aansluiting tussen de luchtdichting van het dak en de HSB-wand, moeten beide al afzonderlijk luchtdicht gemaakt zijn. De damprem komt tot een 4-tal cm over de voeg van de HSB-wand. Het is belangrijk de baan met een lus aan te sluiten, zodat bewegingen van de beide constructiedelen kunnen worden opgevangen. De folie wordt met een universele kleefband of met een luchtdichte lijm verbonden met de HSB-wand.

Luchtdichte aansluiting tussen schrijnwerk en pleisterwerk.
De aansluiting gebeurt met behulp van een speciale inpleisterbare dampremmende aansluitstrook. De aansluitstrook wordt bij voorkeur bevestigd op het raam- of deurkader vóór het kader in de raam- of deuropening geplaatst wordt. Het raam wordt daarna vlak geplaatst op schragen op de gepaste werkhoogte. Het afdekpapier van de kleefband wordt weggenomen. De aansluitstrook wordt rondom het raamkader gekleefd. De ramen worden geplaatst. Om de plaatsing te vergemakkelijken, kan het gaas van de aansluitstrook tijdelijk naar binnen gebogen worden en tegen de binnenkant van het raam gekleefd worden. De aansluitstrook moet continu verbonden blijven met het raamkader. Het raam wordt gemonteerd in de raamopening en de ruimte tussen spouwisolatie en het raam wordt opgevuld met isolatie. De aansluitstrook wordt weer overgeplooid. De bepleistering wordt aangebracht en de aansluitstrook wordt mee ingepleisterd.

Luchtdichte aansluiting tussen schrijnwerk en HSB-wand
Na de plaatsing van het schrijnwerk wordt tussen het schrijnwerk en de luchtdichte houtderivaatplaten aan de binnenzijde van de HSB een strook damprem gekleefd. De damprem wordt eerst in een hoek van 90° gevouwen, die dan in de hoek tussen het schrijnwerk en het dagvlak geplaatst wordt, en op het schrijnwerk verkleefd wordt. Voor de hoek tussen dagkant en binnenzijde van de HSB-wand, vouwt men eveneens een hoek van 90°. Daarna wordt de dampremmende folie op de luchtdichte houtderivaatplaten van de HSB-wand gekleefd met behulp van kleefband of luchtdichtingslijm.

Om de luchtdichte aansluiting tussen het schrijnwerk en de HSB-wand te vergemakkelijken, kan voor het plaatsen van het schrijnwerk een kader in multiplex bevestigd worden aan het schrijnwerkkader. Rondom het raam wordt dan eerst een continue streng luchtdichtingslijm aangebracht, in een groef in het multiplexkader (dit om te voorkomen dat de lijm geplet wordt tussen kader en schrijnwerk). Daarna wordt het multiplexkader bevestigd aan het schrijnwerk. De hoeken van het kader worden luchtdicht aan elkaar gekleefd met universele kleefband, of met luchtdichtingslijm. Vervolgens wordt het multiplexkader luchtdicht aangesloten op de luchtdichte houtderivaatplaten van de HSB-wand met een strook damprem of met kleefband.

4.4.4 Constructie- en materiaaleigenschappen

Er dient geduid te worden dat de voorgestelde constructie- en materiaaleigenschappen slechts één oplossing is. Er zijn nog andere, goede oplossingen mogelijk.

4.4.4.1 Aansluiting met de fundering

De funderingen en de vloer op volle grond of eventueel boven een (kruip)kelder, zijn meestal vervaardigd uit beton of baksteen. Ofwel gebruikt men een gewapende betonnen funderingsplaat op volle grond, ofwel – indien er een kelder of kruipruimte is – predallen of holle welfsels, met een opstortlaag. De funderingsplaat wordt gegoten en steunt ofwel op volle draagkrachtige grond ofwel op de funderingsmuren. Voor het gieten wordt over de volledige oppervlakte een vochtfolie geplaatst, zodat eventueel grondwater niet kan doordringen tot in de vloer en het beton bij het storten niet te snel uitdroogt door het contact met de (droge) grond. Op de draagvloer worden de elektriciteitsleidingen en koud water leidingen voorzien. De funderingsopstand wordt beschermd tegen indringend en/of opstijgend vocht. Ze kan bestaan uit cellenglas, een houten opstand of een laag gemetselde isolerende blokken (bijvoorbeeld cellenbetonblokken). De opstand wordt beschermd tegen opstijgend vocht door middel van een continue waterdichte laag, bijvoorbeeld uit bitumen of EPDM, die vanop de buitenzijde van de aanzet, langs de betonplaat, tot aan de buitenzijde van de funderingszool wordt gebracht en daar wordt vast gebrand of gekleefd.

De opbouw bestaat verder uit een uitvullaag voor leidingen, drukvaste isolatieplaten met daarop een gewapende chape, en de vloerafwerking. Na het aanbrengen van de leidingen, wordt de uitvullaag gestort op de draagvloer. Er moet op gelet worden dat de laag voldoende vlak uitgevoerd wordt, zodat er geen luchtholten ontstaan onder de isolatieplaten die erop komen. Op de uitvullaag wordt eerst nog een luchtdichtingsfolie gekleefd die de thermische isolatie zal afschermen van eventueel vocht uit de uitvullaag. De folie wordt omhoog gezet tegen de opstanden om later de luchtdichte aansluiting te maken met de luchtdichtingslaag van de buitenmuren.

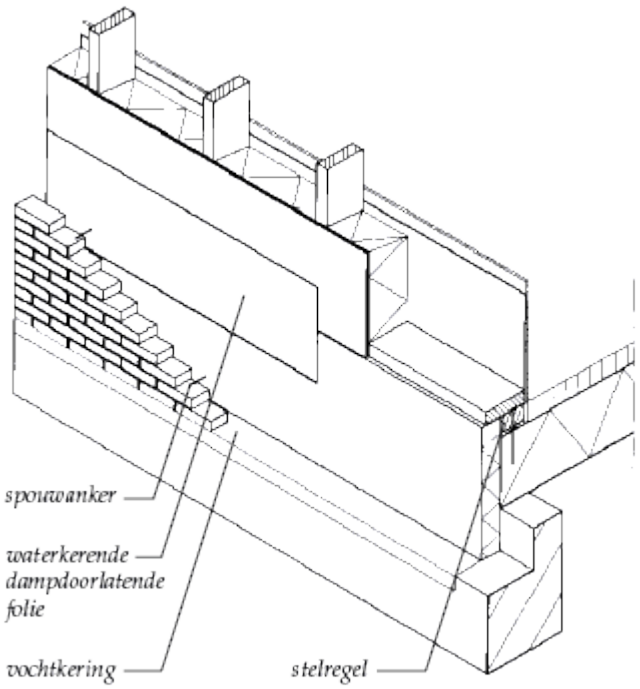


Fig 25 Aansluiting buitenwandelement met begane grondvloer en fundering [6]

De vloerisolatieplaten zijn bij voorkeur tand en groef, zodat ze goed aansluiten. Bovenop de isolatie voorziet men dan een vochtfolie zodat de specie van de chape of draagvloer die er nog op komt, niet tussen de naden dringt en een koudebrug vormt. De folie wordt geplaatst met voldoende overlapping en afgekleefde naden.

De sanitaire leidingen die het warmwater vervoeren, worden op de PE-folie geplaatst en met klemmen vastgezet in de isolatie. Deze klemmen moeten verhinderen dat de buizen omhoog komen bij het plaatsen van de chape. Belangrijk is dat de PE-folie hierbij niet gescheurd wordt en zo weinig mogelijk doorboord wordt.

Bij het gebruik van niet-dampdichte isolatiematerialen, zal er tussen de uitvullingslaag en isolatie eveneens een vochtwerende dampremmende folie worden aangebracht over de gehele vloeroppervlakte. Dit om te verhinderen dat er vocht vanuit de funderingsplaat in de isolatie kan dringen en om inwendige condensatie te vermijden. Inwendige condensatie kan immers in twee richtingen optreden. Indien gebruik gemaakt wordt van een hydrofoob, dampdicht isolatiemateriaal, is deze folie overbodig.

De uitvullingslaag voor de leidingen bestaat uit een licht isolerende mortellaag met een dikte afhankelijk van de afmetingen van de leidingen. De vloer moet voldoende luchtdicht en geïsoleerd zijn om warmteverliezen en vocht in de constructies te vermijden. De nodige folies worden aangebracht om indringend en/of opstijgend vocht in de constructie te voorkomen. [82]

De isolatie kan ook onder de vloerplaat geplaatst worden. Dan kiest men best voor een drukvast hydrofoob isolatiemateriaal, zoals geëxpandeerde kleikorrels, cellenglas, XPS of EPS. Men dient ervoor te zorgen dat de ondergrond zeer vlak is afgewerkt. De

vochtfolie komt onder de isolatie te liggen en onder de draagvloer. Bij deze optie wordt de chape rechtstreeks op de funderingsplaat aangebracht. Deze laag pakt alle leidingen en buizen in; een uitvullingslaag wordt dan overbodig. Een voordeel van isolatie onder de draagvloer, is dat de koudebruggen ter hoogte van aansluitingen van muren op de funderingsplaat opgelost worden.

De chape wordt verstevigd d.m.v. een wapening van metaalgaas of wapeningvezels in staal of polypropyleen. De uitzettingsvoegen in de chape kunnen gebeuren met een polystyreenband. Eens de dekvloer voldoende is uitgedroogd, wordt de vloerafwerking geplaatst. Om vervormingen door hydraulische krimp en thermische zettingen mogelijk te maken, en om de koudebrug tussen wand en dekvloer te beperken, voorziet men voor het aanbrengen van de dekvloer een randisolatie. Er worden uitzettingsvoegen voorzien in de dekvloer, om vervormingen en thermische zettingen mogelijk te maken.

De aansluiting tussen de wandelementen en de begane grondvloer kan met of zonder stelregel geschieden. De stelregel is meestal 38 tot 45 mm dik, en 90 tot 120 mm breed. Bij toepassing van een stelregel dient men ze waterpas en op de goede hoogte af te stellen. De maatvoering en juiste positie zijn erg belangrijk; hier bouwt men immers op verder. De bovenzijde van de muuraanzet bevindt zich bij voorkeur op 15cm afstand t.o.v. het maaiveld. De stelregel is van een duurzamere houtsoort[11] dan de rest van de houten constructie. Dit omdat ze beter weerstand biedt tegen vocht, en grote belastingen dient op te nemen van de bovenstaande constructie. Met behulp van slagschroefnagels of andere pluggen wordt de stelregel bevestigd.

Hij kan ook vastgezet worden met behulp van ingestorte draadeinden. De ruimte tussen de stelregel en de vochtkerende folie boven de begane grondvloer bedraagt bij voorkeur zo'n 15mm, die dan wordt opgevuld met krimpvrije mortel, zodat er een continue ondersteuning en (eventueel ook) luchtdichting is. Eens de mortel verhard is, kan men verdergaan met de plaatsing van de wandelementen. Indien men geen gebruik maakt van een stelregel, staat de wandconstructie direct op de al vlak afgewerkte betonvloer, ofwel wordt ze met stelblokjes opgesteld op de onafgewerkte betonvloer. Ook hier wordt weer cementmortel gebruikt om de holtes onder de stelregel op te vullen. De bescherming tegen capillair opstijgend vocht wordt verzekerd door middel van vochtkerende folies (vb. EPDM of DPC) onder de structuur. Om een goede luchtdichtheid te verzekeren, wordt onder de onderregel van de wandconstructie, dus op de stelregel, een samendrukbare dichtingsband van neopreen aangebracht. Dit zorgt ervoor dat kleine foutjes in de stelregel geëlimineerd worden. De dichtingsband wordt door de belasting van de bovenliggende verdiepingen samengedrukt, waardoor voldoende kierdichting gerealiseerd wordt.

De wandelementen worden vanaf de buitenzijde op de stelregel bevestigd met steeknagels.

[11] In het geval van het typedetail funderingsaanzet, is de houtsoort van de stelregel *Angelim Pedra*.

De afstand tussen de aanzet van de houten structuur[12], en het maaiveld bedraagt minimaal 15cm. De thermische snede dient verzekerd te worden, ter hoogte van de aansluiting tussen de wand- en de vloerisolatie. De HSB-structuur wordt vooraf berekend in een stabiliteitsstudie [82]. Onderaan, ter hoogte van de sokkel, wordt een winddichte, waterkerende laag aangebracht die tot aan de buitenzijde van het buitenspouwblad leidt en het spouwvocht afhellend naar buiten voert. De laag wordt bevestigd aan de wandopbouw.

De geprefabriceerde HSB-wanden worden via de onderregel op de stelregel bevestigd.

4.4.4.2 Elementaire wandopbouw

De verticale kepers van het raamwerk, met rechthoekige of I-vormige sectie, staan op een vaste afstand van elkaar (40 of 60cm h.o.h., afhankelijk van de resultaten van de stabiliteitsstudie), gebaseerd op de standaardafmetingen van isolatiemateriaal en de afmetingen van het plaatmateriaal (120 cm). De verbinding tussen de verschillende wandkasten gebeurt meestal met gladde of getordeerde nagels.

In België gebruikt men - zoals in § 3.8 al vermeld - meestal kepers van Europees hout met minimumafmetingen 38x89 mm. De afmetingen hangen af van het aantal woonlagen die gedragen moeten worden en van de onderlinge afstand tussen de stijlen. Om het hout op een zo economisch mogelijke manier te gebruiken, opteert men voor zo klein mogelijke overspanningen, balken op meerdere steunpunten, koppelingen van balken, ed. Om het koudebrugeffect te reduceren bij een massief houten kader, is het mogelijk de draagstructuur te ontdubbelen, zodat je twee houtskeletkaders geschrankt tegen elkaar krijgt. [82]

De wandkasten bestaan uit een onder- en bovenregel, met daartussen stijl- en regelwerk. De verbinding tussen de 'kaders' gebeurt met koppelregels, met dezelfde sectie als de stijlen, genageld op de bovenregels. Eventueel wordt dichtingsband aangebracht tussen verticaal aansluitende kaders.

[12] D.i. de bovenzijde van de funderingsopstand

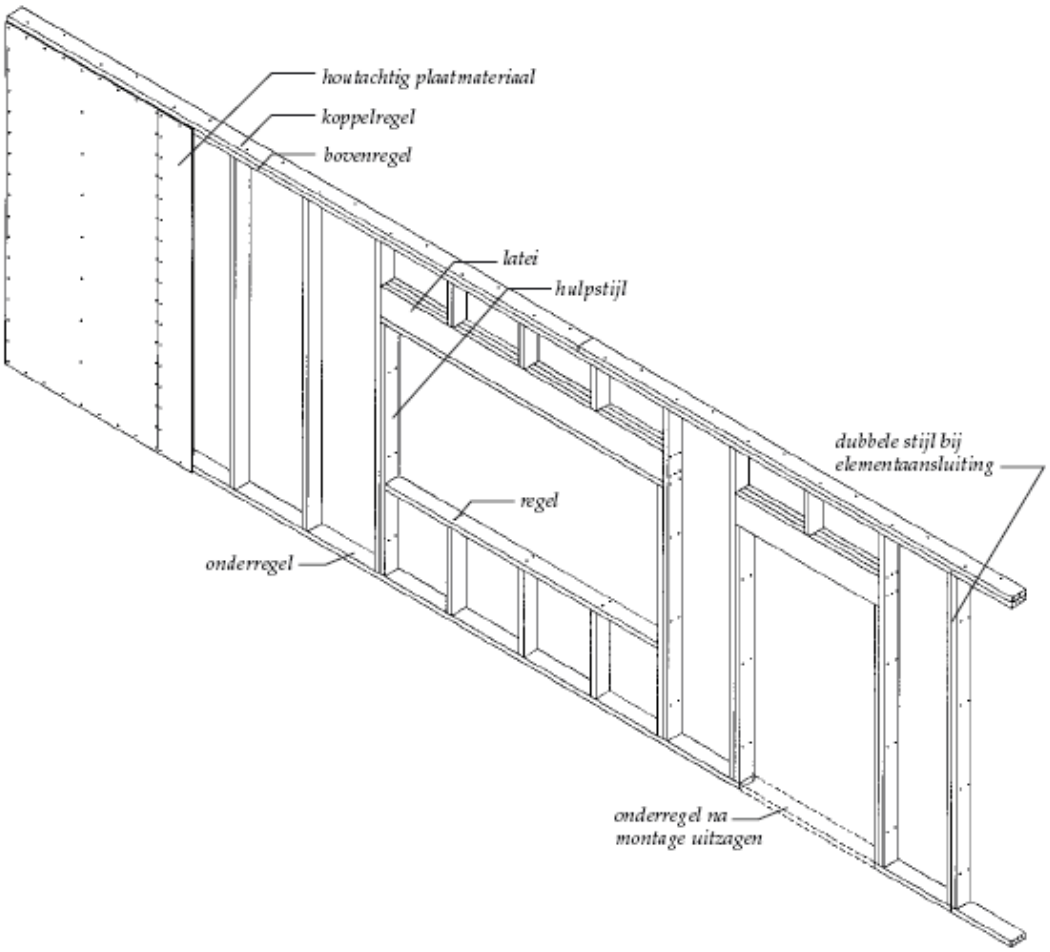


Fig 26 Wandopbouw met wandelementen, onderling gekoppeld met koppelregels [6]

Boven openingen voor deuren en ramen bevestigt men lateien. Mogelijks zijn er bijkomende hulpstijlen nodig om de belasting van de latei te kunnen dragen. Ze worden gekoppeld aan één of meer doorlopende wandstijlen om de windbelasting op te vangen.

Als men later iets wil ophangen aan de wand, moet dit met speciale pluggen en haken gebeuren. Indien het een zwaarder voorwerp betreft, zoals bijvoorbeeld een lavabo, dient de bevestiging te gebeuren ter plaatse van een houten stijl of regel. Over de plaatsing van dergelijke zaken moet dus al goed nagedacht worden in het ontwerp.

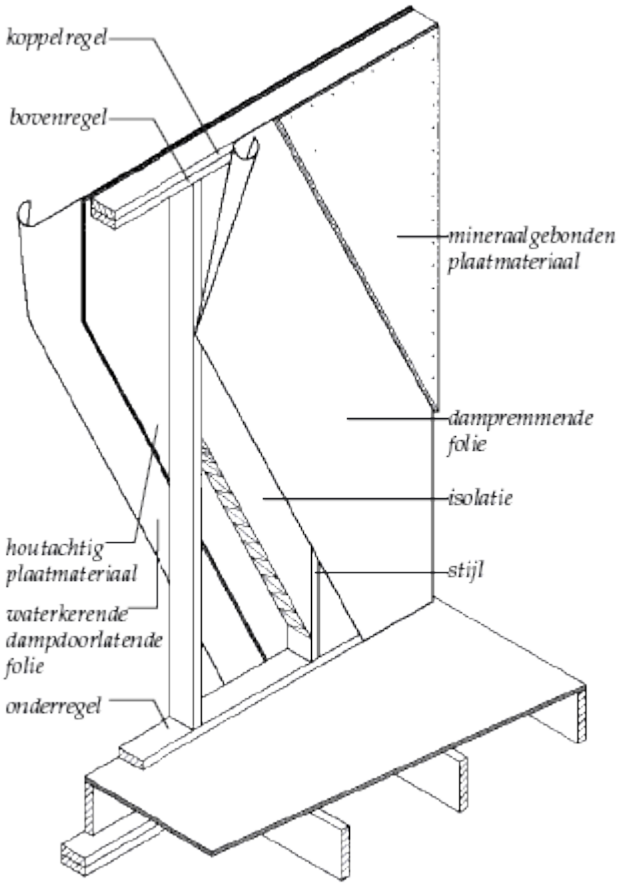


Fig 27 Opbouw van een buitenwandelement [6]

De binnenzijde van de houtstructuur wordt bekleed met luchtdichte, dampremmende houtvezelplaten, of een dampremmende folie. De harde houten plaatmaterialen dienen tevens als verstijving van de constructie. Deze platen worden dan ook vaak als eerste aangebracht. Op de tand- en groefverbinding worden ze verlijmd en daarna geschroefd op de houten structuur. De naden worden luchtdicht afgekleefd met hiervoor geschikte kleefband. Doorboringen voor contactdozen, inbouwspots, ... moeten vermeden worden. Indien men aan de binnenzijde een beschieting aanbrengt die niet voldoende dampremmend of luchtdicht is, moet men een dampremmende folie (bijvoorbeeld PE-folie) voorzien aan de binnenzijde.

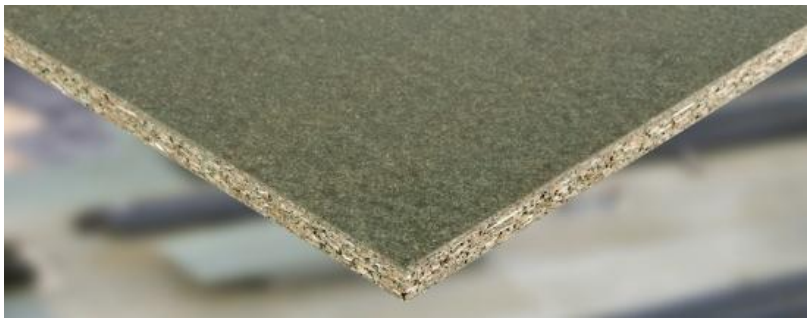


Fig 28 Luchtdichte, dampremmende houtvezelplaat (SpanoGroup Durélis/Populair)

De platen hebben best een tand- en groefverbinding, om ze volledig luchtdicht te krijgen.

Tegen de houten structuur komen aan de buitenzijde water- en winddichte, maar dampopen zachte houtvezelplaten, bijvoorbeeld houtwolplaten. De platen zijn waterbestendig doordat ze gebitumineerd of gelatexeerd zijn. Ze zijn sterk dampdoorlatend, en hebben meestal een dikte van 18 of 22mm. Ze zijn bij voorkeur voorzien van een tand- en groefverbinding, om een goede water- en winddichting te verzekeren. Indien dit niet het geval is, moeten de naden afgeplakt worden met kleefband. De houtvezelplaten hebben meestal een redelijke isolatiewaarde, waardoor ze de koudebrugwerking van de houten stijlen kunnen inkrimpen. De platen worden eerst tijdelijk bevestigd met nagels met platte kop of schroeven, en daarna met rvs nieten. Indien er een houten gevelbekleding is, worden de platen bevestigd door er de montagelatten voor de gevelbekleding op vast te maken.

Eventueel kan men ook bij niet zo waterbestendige houtvezelplaten, een dichtingsfolie aanbrengen. Deze is waterdicht, maar moet wel sterk dampdoorlatend zijn.

Indien het een gevelbekleding betreft met open voegen, dient in elk geval een wind- en waterdichtingsfolie aangebracht te worden op de structuur, om indringing door slagregen te vermijden. De folie wordt in horizontale banen aangebracht, waarbij men onderaan begint. De banen hebben een overlap nodig van 100mm, en worden aan elkaar gekleefd met (dubbelzijdige) kleefband.

Fig 29 Dampopen houtwolplaat (Gutex)

Tussen het stijl- en regelwerk van de houten constructie, komt zacht, samendrukbaar isolatiemateriaal in matten, dekens of in te blazen vlokken. Voor deze laatste optie moeten uiteraard zowel de luchtdichting als winddichting al aangebracht zijn. Indien er aan de binnenzijde enkel een dampremmende folie gebruikt wordt (en dus geen luchtdicht gemaakte platen), moet er eerst ondersteuning voorzien worden d.m.v.

montagelatten. Het isolatiemateriaal is dampopen. Wil men een grotere isolatiedikte, dan kan men grotere afmetingen voor de stijlen gebruiken, of extra isolatie voorzien in de spouw.

Ook isolatiemateriaal dat in de spouw geplaatst wordt, moet dampopen zijn. Waar vochtwerende lagen doorheen de isolatie dringen (bijvoorbeeld voor de afvoer van spouwwater), worden de platen in vorm gesneden om er goed op te kunnen aansluiten. Indien men opteert voor meerdere isolatielagen boven elkaar, wordt de eerste laag voorlopig vastgeplugd, waarna de tweede laag vastgezet wordt door middel van een gecombineerd bevestigingssysteem voor isolatiemateriaal en spouwanker. Door de extra isolatielaag in de spouw, kan men de (beperkte) koudebrugwerking van de houten stijlen iets doen afnemen.

Zoals bij elke andere bouwmethode, dient men ook hier mortelspecie in de spouw te voorkomen, om vocht- en koudebruggen te vermijden.

De rondstalen spouwankers hebben een diameter van 4mm, en zijn voorzien van een schroefdraad.

Voor de binnenafwerking kan men gipskarton-, gipsvezel- of houtvezelplaten gebruiken. In lokalen met een hogere vochtbelasting, zoals badkamers, moet de afwerking een hogere vochtweerstand bezitten.

Als men kiest voor een leidingspouw aan de binnenzijde, tussen de luchtdichting en de binnenafwerking, kan men de continuïteit van de luchtdichting verzekeren. De spouwlatten kunnen horizontaal of verticaal geplaatst worden. De leidingspouw kan na het plaatsen van de leidingen nog opgevuld worden met flexibele isolatie. Deze vergroot de thermische isolatie en voorkomt dat geluid in de leidingspouw versterkt zou worden. Indien men geen leidingspouw wil, moet men de leidingen in de vloeren, binnenmuren en eventueel verlaagde plafonds voorzien. De afwerking van de leidingspouw gebeurt op dezelfde manier als zonder. De bevestiging wordt aangebracht op de spouwlatten.

De mogelijkheden met betrekking tot gevelbekleding tenslotte, zijn legio: houten latten, leien, houten shingles of shakes, steen, baksteen, ... Deze wordt uitgevoerd volgens de regels van de kunst [82]. Welk materiaal men ook gebruikt, een goede ventilatie erachter is noodzakelijk. Dit is om het materiaal voldoende te laten uitdrogen aan de achterzijde, en te laten afkoelen bij zonnestraling.

Bij metselwerk dient een luchtspouw van minimum 40 mm voorzien te worden. De spouw mag niet te klein zijn, om al te grote spanningen in de spouwankers door de werking van de gevelbekleding en de houtconstructie te vermijden. Het metselwerk dient onafhankelijk te zijn van het hout. Het hout leeft immers en de krimp zou scheuren veroorzaken in het metselwerk. De spouwankers van rondstaal, die het buitenspouwblad vasthouden, worden in de houten stijlen geschroefd. De open stootvoegen om het spouwwater af te voeren, bevinden zich vlak boven het maaiveld voor ventilatie van de spouw, en ook helemaal onderaan, om het water af te voeren.

Een houten gevelbekleding kan al in het atelier aangebracht worden. Meer informatie over de 'best practice' van houten gevelbekledingen, is terug te vinden in hoofdstuk 6.

Pleisterwerk als gevelbekleding kan aangebracht worden met of zonder luchtspouw. De luchtspouw wordt gecreëerd door een extra plaatmateriaal dat dient als ondergrond. Indien er geen luchtspouw gebruikt wordt, wordt de pleister rechtstreeks aangebracht op een harde isolatieplaat op een mineraalgebonden plaatmateriaal, die aan de houtstructuur is bevestigd.

4.4.4.3 Sanitaire ruimtes

In sanitaire ruimtes, die in de regel onderworpen zijn aan een grote vochtbelasting, dient men bijkomende maatregelen te treffen die beletten dat water kan infiltreren in de wanden en vloeren. Daarbij zijn de wand- en vloerbekleding vanzelfsprekend een cruciale factor: tegels en kunststof bekleding zijn courante afwerkingsmaterialen.

Bij tegels is het aan te raden bovenop de constructievloer eerst een extra onderplaat van triplex of OSB te voorzien, om de ondergrond voldoende stevig en vlak te maken. Daarna wordt een cementgebonden dekvloer met wapeningsnet geplaatst. Een algemene wapening (50 x 50 x 2 mm) wordt vaak aanbevolen, om de spanningen veroorzaakt door thermische uitzetting en hydraulische krimp, te verdelen. De wapening wordt meestal in het midden van de dekvloer geplaatst; bij zwevende dekvloeren bevindt ze zich op één derde van de dikte, vanaf de onderkant te meten.

De opbouw kan in plaats van een dekvloer ook bestaan uit een stalen zwaluwstaartplaat, waar het beton opgestort wordt, en zo een samenwerkend geheel van beton en staal creëert. Dit constructief pakket is wel dikker, met als gevolg dat de houtconstructie van de onderliggende vloer daar plaatselijk moet verlaagd worden.

De tegels worden bevestigd op de dekvloer met tegellijm of in een mortelbed. Eens het geheel droog is, worden de tegels opgevoegd, zodat de vloer werkt als één geheel/schijf.

Indien men opteert voor een kunststof bekleding van de sanitaire ruimte, dient men ervoor te zorgen dat de bekleding van de wand bevestigd wordt na de bevestiging van de vloerbekleding. Ter plaatse van leidingdoorvoeren, zorgt men voor een waterdichte afwerking met een elastische kit. Mineraalgebonden plaatmaterialen die in sanitaire ruimtes gebruikt worden, moeten eveneens behandeld worden tegen vocht, met een waterdichte coating. [6]

4.4.4.4 Elementaire vloeropbouw

Tussen twee verdiepingen wordt de plankenvloer geconstrueerd door middel van een houten balkenlaag (roostering) die rust op de wanden. De balken aan de randen zijn kop- en randbalken. De afmetingen van de vloerbalken bedragen meestal 38x235mm of 46x221mm en kunnen daarmee een afstand overspannen van ongeveer 4m. Naast

timmerhout kan men ook LVL-balken, GGH-balken of I-liggers gebruiken, die een grotere overspanning aankunnen. Een ander alternatief is de hout-betonvloer. Hierbij complementeren de eigenschappen van hout en beton elkaar. Het hout werkt op trek. Omdat deze methode zo prijzig is, gebruikt men ze best enkel voor erg grote overspanningen en gelijkerwijze belastingen en bij hoge geluidsisolatie-eisen. De methode wordt ook soms toegepast bij renovatieprojecten.

Net zoals bij de stijlen van de wanden bevinden de balken zich op een regelmatige afstand van elkaar en zijn de afmetingen afgestemd op de afmetingen van de houtplaten (2440 mm) die erop komen. De maximale balkafstand is 60cm, voor een plaat van 18 à 19 mm dik . Tussen de balken worden normaal op regelmatige afstand klossen voorzien om kippen te voorkomen en de belasting te verdelen. Ook zogenaamde andreaskruissen worden gebruikt om het vloerpakket te verstijven. Ze worden bevestigd met ringnagels. Langs de randbalken worden eveneens klossen aangebracht om de windbelasting te helpen opnemen. De maximale niet-ondersteunde lengte bedraagt 2,4 m. Ter plaatse van binnenwanden worden klossen gebruikt om de geluidsoverdracht en brandoverslag tussen twee aangrenzende ruimtes te beperken. Zo worden ook de schuifkrachten rechtstreeks overgebracht op de wand. De bevestiging tussen de verschillende houtelementen gebeurt met gladde of getordeerde nagels of met plaatstalen balkschoenen en hoekankers.

Indien de overspanning te groot is, of de belasting die moet afgeleid worden te zwaar, kan het nodig zijn dat een dragende binnenwand en/of een onderslagbalk de vloerbalken ondersteunt en zo een deel van de krachten afleidt. Dit resulteert in een meer economisch materiaalgebruik. De onderslagbalk steekt al dan niet onder de roosterbalken uit. Indien ze eronderuit steekt, kunnen de vloerbalken doorlopen. Indien ze in het vloerpakket verwerkt zit, kunnen de vloerbalken niet doorlopend zijn. De onderslagbalk kan een gewone vloerbalk zijn, een gelamineerde ligger of een stalen profiel. Dit laatste is echter wel erg gevoelig voor krimp. Alle vloerstructuurelementen worden aan elkaar gekoppeld door middel van draadnagelverbindingen. De gesloten elementen worden aan elkaar bevestigd met houtdraadbouten. Om de trekkrachten ter hoogte van stabiliteitswanden op te nemen, worden stalen strips of hoekstalen in combinatie met draadankers en houtdraadbouten gebruikt.

De opbouw van de verdiepingsvloer gebeurt als volgt.

Op de HSB-wand, die op dat moment is opgebouwd uit de houten stijlen of I-profielen, een bovenregel, en een houtachtige plaat aan de binnenzijde ter verstijving, wordt een lap wachtfolie (luchtdichtingsfolie) geplaatst. Om de folie te beschermen en op zijn plaats te houden, kan er een muurplaat op gelegd worden, die dan eveneens de kasten van de HSB-wand verbindt met elkaar. Hierop komt dan een dubbele balk, waartussen isolatie geplaatst wordt. De dubbele balk draagt de bovenliggende belastingen. Eventueel kan men ook een enkele balk voorzien, en stroken randisolatie tussen de

roostering plaatsen. De vloerbalken rusten op de muurplaat, met een voldoende groter overlapping.

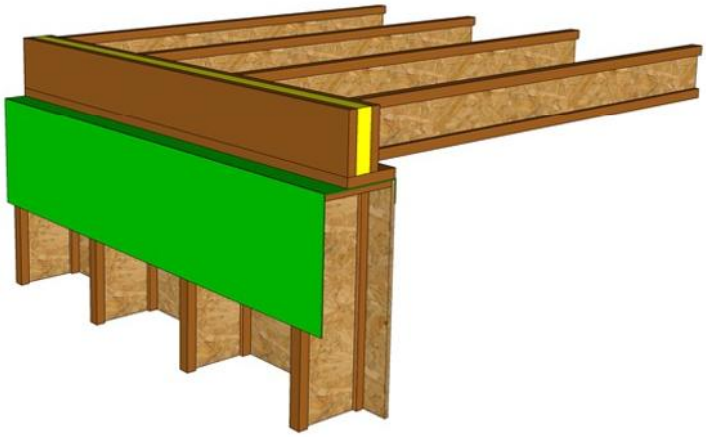


Fig 30 Vloeropbouw. Op de HSB-wand bevestigt men een wachtfolie, die omgeplooid wordt naar buiten toe. [80]

Bovenop de houten roostering komt vervolgens een plaatmateriaal (bijvoorbeeld multiplex, OSB, spaanplaat), van minimum 18mm dik, waarvan de richting loodrecht staat op de richting van de roostering. De platen zijn onderling verbonden door het tand- en groefprincipe en worden bevestigd op de vloerbalken langs de korte plaatzijde. Dit gebeurt met getordeerde draagnagels of met ringnagels. Soms worden de platen ook gelijmd.

De luchtdichtingsfolie wordt over de platen geplooid, om de bouwknoop wand-vloer luchtdicht te maken. Om de folie te beschermen komt hier, vóór de plaatsing van de houtskeletwand erboven, nog een muurplaat op. Eens alles geplaatst, kan het houtskelet opgevuld worden met schuimisolatie. Indien men eerder isolatierollen of –platen verkiest, dienen deze aangebracht te worden voor het binnen- of buitenscherm geplaatst is. De luchtdichtingsfolie die tussen de aansluiting wand-vloer zit, kan nu verlijmd worden met luchtdichtingsfolie op de wanden, om zo één luchtdicht geheel te creëren.

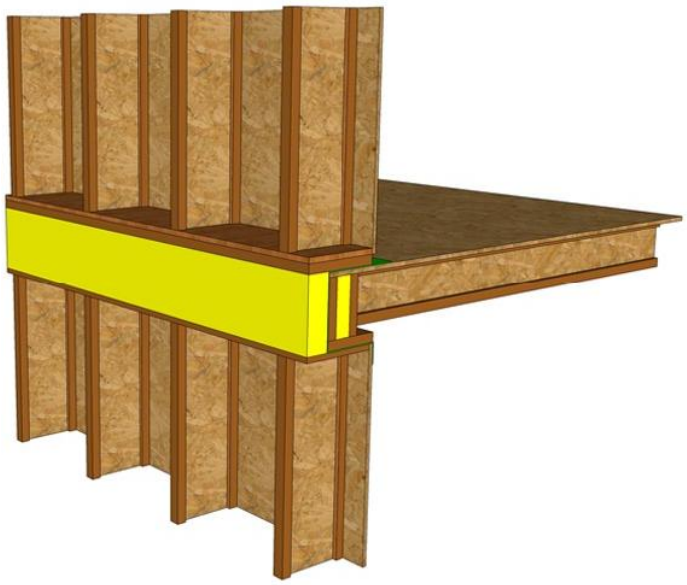


Fig 31 Vloeropbouw. De wachtfolie is over de kopbalk geplooid, en wordt luchtdicht verbonden met de luchtdichting van de wand. [80]

In de holtes tussen de balken kan techniek geïntegreerd worden; eventueel kan een leidingspouw voorzien worden. In de holtes in de roostering, kan ter verbetering van de akoestiek, ook een laag isolatie aangebracht worden. Dit isolatiemateriaal (bv. minerale wol) moet soepel zijn zodat de holte eenvoudig gevuld kan worden en het geluid door de zachtheid van het materiaal geabsorbeerd kan worden. De bekleding onderaan de balken, of aan de onderkant van de voorziene leidingspouw, gebeurt meestal met gipskarton- of gipsvezelplaten. Eventueel kan men ze dubbel aanbrengen om de luchtgeluidisolatie en de brandweerstand te verbeteren. Voor akoestische redenen is het ook aangeraden een zwevende dekvloer te voorzien. Op de draagvloer plaatst men dan eerst een dunne isolatielaag, bedekt door een kunststoffolie, waarop dan de dekvloer komt.

Halfopen elementen zijn bij verdiepingsvloeren de meest courante prefabricatiemethode. Daarbij zijn de balken, onder andere ook de kopbalken en randbalken, al aan mekaar bevestigd, en ook de beplating uit OSB, triplex of spaanplaat is aangebracht. De verdiepingsvloer wordt echter vaak nog in situ geconstrueerd, in plaats van geprefabriceerd.

4.4.4.5 Elementaire dakopbouw

Bij een hellend dak zijn alle gekende uitvoeringen bij andere bouwmethodes mogelijk. Het houtgebinte kan geprefabriceerd worden. Meestal is er een dun onderdak uit folie, biplex, Menuiserite[13], of dikkere platen zoals Celit 4D[14] of Gutex[15], ... De dakbeplating met tand en groef verzorgt de schijfwerking van het dak. De dikte ervan hangt af van de afstand tussen de sporen of gordingen. De dwarsstijfheid kan bereikt worden met een diagonaal bandijzer. De dakisolatie van minerale wol of flensdekens bevindt zich bij hellende daken traditioneel tussen de spanten, gordingen of kepers. Dit betekent dat er een koudebrug is ter plaatse van de houten constructie-elementen.

Voor de constructie van een plat dak kan men uitgaan van de klassieke constructie (enkel warm of omgekeerd dak), zoals die bij andere bouwmethoden ook toegepast worden.

Hellend dak

Wat de verdere uitwerking van de dakopbouw betreft, worden hieronder 4 types daken besproken: de sporenkap, de gordingkap, het flauw hellend dak en het plat dak.

Sporenkap

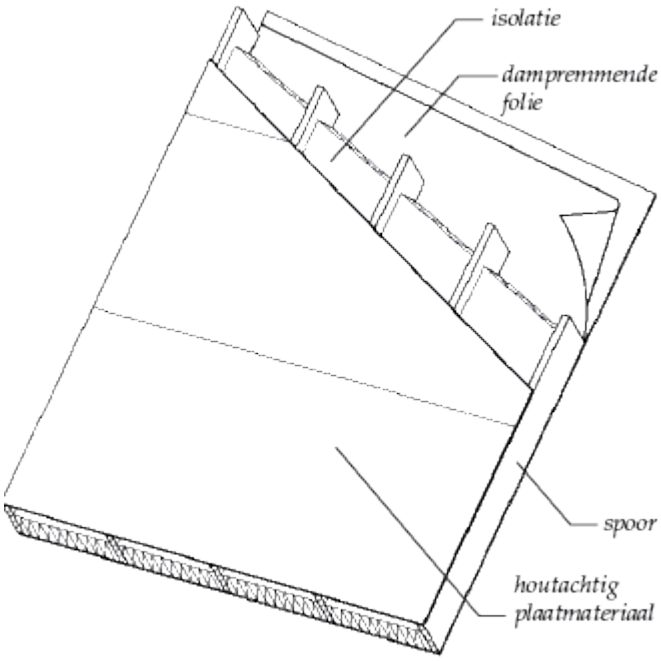


Fig 32 Sporendakpakket [6]

[13] Menuiserite is een vezelcementplaat.
[14] De Celit 4D plaat is samengesteld uit houtvezels en bitumen.
[15] Een Gutex-plaat is een houtwolvezel isolatieplaat.

Aan de bovenzijde van het hellend dak wordt het onderdak of een stevige, waterkerende folie geplaatst. Op het onderdak worden de tengel- en pannenlatten aangebracht, en vervolgens de pannen. De goot wordt geïnstalleerd. Een afwateringsfolie leidt het weinige regenwater dat via het onderdak naar beneden stroomt, naar de goot.

Aan de binnenzijde van het hellend dak wordt een damprem aangebracht, die tegelijk dient als luchtdichting. De ondersteuning van de damprem en de isolatie gebeurt door plafondlatten, die maximaal om de 50 cm worden aangebracht op de sporen. [80]

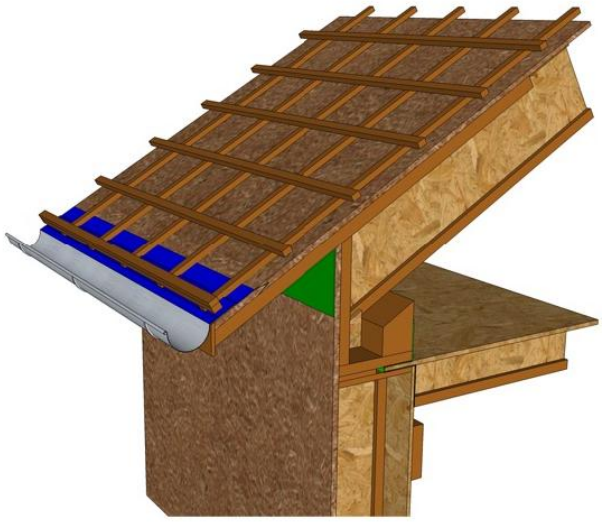


Fig 33 Sporendakpakket: zicht op onderdak, tengel- en pannenlatten [80]

De isolatie kan nu ofwel ingeblazen worden, ofwel gebruikt men isolatieplaten of rollen, die vóór de plaatsing van de damprem, aangebracht worden.

Ter afwerking aan de binnenzijde plaatst men een plafondplaat waarachter de dampremmende folie zit om het damptransport naar de constructie te vermijden.

De spatkrachten worden opgenomen door de basis van de driehoek die de hellende dakdelen vormen. Als de sporen en de vloerbalken van de zolder in dezelfde richting overspannen, worden de spatkrachten opgenomen door de vloerbalken. Als de richting van de sporen echter loodrecht staat op de richting van de vloerbalken, nemen de vloerplaten de spatkrachten mee op. Indien een tussensteunpunt nodig is voor de hellende dakdelen, kan een extra zoldervloer voorzien worden.

Fig 34 Sporendakpakket: zicht op de geplaatste isolatie, dampremmende laag en leidingspouw-latten. [80]

Gordingkap

Bij de gordingkap lopen de balken horizontaal van woningscheidende muur tot woningscheidende muur, of van spant tot spant. Gordingen zijn balken van gezaagd hout met gestandaardiseerde afmetingen. Vaak zijn tussensteunpunten nodig, onder de vorm van een spant of een dragende binnenwand, of zwaardere gelamineerde liggers. Aan de uiteinden van de balken komen kopbalken. De bevestiging van de balken aan de wanden en de vloer gebeurt met stalen strips of met lange nagels of houtdraadbouten. Een onder- en bovenplaat zijn noodzakelijk. Aan de binnenzijde van de constructie komt een dampremmende folie, de holtes tussen de balken vult men op met minerale wol. Een waterkerende, maar dampopen folie wordt bevestigd op de bovenplaat. Indien die bovenplaat op zichzelf al voldoende waterkerend is, hoeft de folie niet meer voorzien te worden. Een nadeel van een gordingkap is dat eventueel toch ingedrongen water kan blijven staan op de horizontale balken. [6]

Flauw hellend dak

Een flauw hellend dak maakt het gebruik van een bewoonbare zolder onmogelijk. Er worden lichte geprefabriceerde sporenspanten gebruikt.

Plat dak

De opbouw van een plat dak is nogal gelijkaardig aan dat van een verdiepingsvloer.

De structuur van het plat dak bestaat uit balken of I-liggers. De balken, randbalk en kopbalk worden opgelegd op een muurplaat, die op de houtskeletwand wordt geplaatst, en die tegelijk dient als koppelregel tussen de verschillende wandkasten.

Op de randbalken construeert men de dakopstand, een soort ladderconstructie, die een stijf geheel vormt met de randbalk door de bevestiging van een multiplexplaat aan de buitenzijde. Op de balken of I-liggers worden hellingsspieën gevezen om de waterafvoer

van het dak te verzekeren. Hierop komt een massief houten beplanking of beplating. De dakopstand wordt geïsoleerd, zowel tussen de houten stijlen als in een extra laag ervoor. Dit wordt gedaan om het koudebrugeffect van de dakopstand in te perken en om al te grote thermische spanningen die zouden kunnen ontstaan in de dakopstand wanneer de zon pal op het plat dak schijnt, te vermijden. De dakoversteek wordt geplaatst op de dakopstand en de dakbedekking wordt bevestigd. De geïsoleerde dakopstand in laddervorm hoeft niet wanneer aan de buitenzijde van het houtskelet met voldoende overlap een plaat is vastgemaakt, die voor de verstijving van de dakopstand zorgt (zie ook typedetail plat dak). [80]

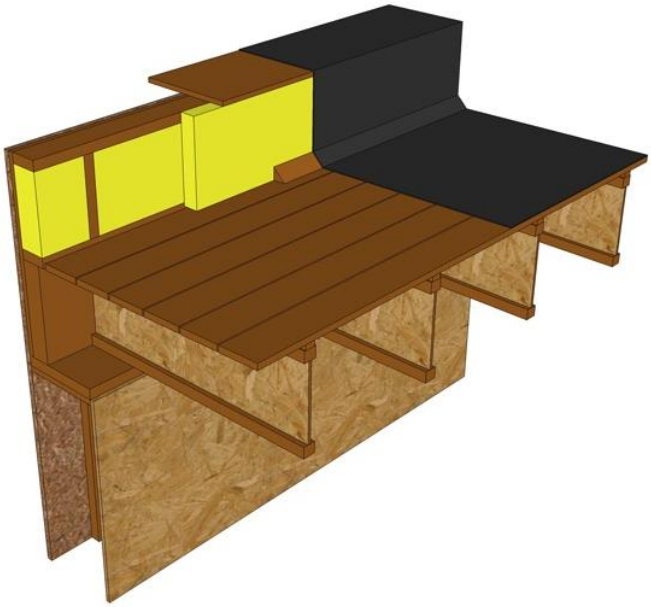


Fig 35 Plat dak. Dakopstand [80]

De holte tussen de balken of I-liggers kan vervolgens worden ingeblazen met isolatiemateriaal. Indien men voor isolatierollen opteert, hoort de isolatie reeds aangebracht te zijn voor de bevestiging van de dampremmende laag. De binnenafwerking kan analoog gebeuren als bij een hellend dak. Na de oprichting van de gevel, kan het dakrandprofiel bevestigd worden en gebeurt de aansluiting met het dakdichtingsmembraan.

Een alternatief is om het isolatiepakket bovenop de roostering aan te brengen. Meer informatie hierover bij de fiche van het typedetail plat dak. Beide methodes hebben hun voor- en nadelen; de keuze volgt uit welke prioriteiten men stelt.

Men kan ook werken met een geprefabriceerd dakpakket dat op de balken komt. Indien de belasting te groot is, dient een dragende binnenmuur of een onderslagbalk als tussensteunpunt te fungeren.

4.4.5 Akoestische isolatie

Om houtskeletbouw voldoende akoestisch performant te maken, kan men wegens het lage gewicht geen beroep doen op de massa van de constructie voor de geluidsabsorptie. Een alternatief is de bouwelementen opbouwen volgens het massa-veer-massa systeem. Zo kan men beplating verdubbelen[16], of zwaardere platen toepassen. De wanden kunnen tevens ontkoppeld worden: dit betekent dat er geen stijve verbindingen bestaan tussen de twee elementen waarover geluidsoverdracht zou kunnen plaatsvinden. Verder kan men de holte tussen de twee elementen vullen met geluidsabsorberend materiaal.

Houten vloeren scoren niet goed wat betreft luchtgeluidsisolatie noch contactgeluidsisolatie. Het isolatievermogen kan verbeterd worden door een droog of nat geplaatste zwevende dekvloer, die akoestisch gescheiden wordt van de draagconstructie. De dekvloer rust hierbij op een isolatiemateriaal, dat de veer vormt in het massa-veer-massa systeem. Als isolatiemateriaal worden drukvaste minerale wol, polyetheen of polyethyleen schuim, polyurethaanschuim, kurk of andere organische materialen toegepast. De droge dekvloer bestaat uit twee mineraalgebonden of houtachtige platen op een laag isolatiemateriaal. Het natte dekvloertype bestaat uit een zandcementlaag op een isolatiemateriaal van harde persing.

Daarnaast kan men ook een akoestisch ontkoppeld verlaagd plafond aanbrengen onder de constructie. Dit wordt opgebouwd uit een metalen regelwerk, dat akoestisch onafhankelijk kan worden opgehangen aan de structuur door middel van metalen veerrails, en dat bekleed wordt met mineraalgebonden plaatmateriaal. De platen kunnen ook bevestigd worden op houten regels.

De ruimte tussen de draagbalken wordt opgevuld met een soepel akoestisch absorberend materiaal, zoals glaswol of opencellig PU-schuim. De luchtdichting moet zoveel mogelijk gehandhaafd worden.

4.5 De voor- en nadelen van houtskeletbouw [50]

+ Het hoofdbestanddeel van een houtskeletbouw is natuurlijk **hout**. Hout is een afbreekbaar, recycleerbaar en hernieuwbaar materiaal.
+ Houtskeletbouw is een lichte bouwmethode. Zo zou een HSB-constructie ongeveer 25 à 33% wegen van een traditionele metselwerkconstructie [6]. Dit aspect is ondermeer interessant bij renovatieprojecten, waarbij de extra belasting op de fundering minder in het gedrang komt dan bijvoorbeeld bij een traditionele bakstenen opbouw. Bij nieuwbouw is door het **lichte gewicht** een relatief lichte

[16] Een dubbele beplating verhoogt eveneens de brandweerstand.

fundering mogelijk (zoals een fundering op staal), wat vooral interessant is bij een weinig draagkrachtige ondergrond. Dit kan een belangrijke kostenbesparing opleveren. Daarnaast zorgen het lage gewicht en de beperkte afmetingen van de bouwonderdelen er ook voor dat een houtskeletbouw ook door particulieren kan opgebouwd worden.

+ Hout is relatief makkelijk **bewerkbaar**, zelfs met beperkte vakkennis. De bevestiging met schroeven, lijm, nagels, ... is eenvoudig en wijzigingen zijn eenvoudig aan te brengen.

+ Vooral interessant is het feit dat de isolatie bij hsb tussen de stijlen van het houtskelet terechtkomt, en er dus met een dik isolatiepakket, nog altijd een relatief beperkte muurdikte beslaat. Dit in vergelijking met traditionele bouwmethodes waar de wanddikte soms wel 0.5m bereikt. Dikke muren zijn niet interessant omdat ze kostbare vierkante meters doen verloren gaan, meer materiaal vereisen, minder lichtinval veroorzaken, esthetisch gezien nogal log tonen (zeker bij kleine huizen), ...

− HSB warmt sneller op en koelt sneller af dan een traditionele bouwmethode, die een grotere **warmtecapaciteit** heeft. De warmtecapaciteit is de energie die nodig is om de temperatuur van het materiaal met 1°C te laten stijgen, en wordt uitgedrukt in J/K. Door sommige gebruikers van houtskeletgebouwen wordt dit als onaangenaam ervaren. Het zomercomfort en dan vooral de kans op oververhitting, wordt dan ook vaak in vraag gesteld bij HSB-constructies. Uit onderzoek is echter gebleken dat het zomercomfort in HSB-woningen – ondanks de lage thermische massa – niet beduidend lager is dan in een woning uit metselwerk [42]. In het Belgisch gemengd klimaat maakt de lage thermische massa uiteindelijk niet zoveel uit op de gemiddelde binnentemperatuur tijdens de zomer. Vooral flexibele zonwering die toelaat dat er nog zonnewinsten kunnen benut worden tijdens koudere periodes, thermisch goed geïsoleerde wanden en een gecontroleerde ventilatie zijn belangrijk. Er kan ook een grotere thermische inertie, en aldus een grotere faseverschuiving bereikt worden door het gebruik van constructie-onderdelen met een bijkomende massa, bijvoorbeeld binnenwanden uit baksteen. Hierbij zijn de eerste centimeters van de oppervlakken van wanden en vloeren bepalend, dus is het vooral belangrijk dat het oppervlak voldoende zwaar is. Al deze maatregelen zorgen voor een faseverschuiving van de opwarming door de zonnestraling. De toename van de luchttemperatuur wordt enkele uren uitgesteld.

+ Hout heeft een aanzienlijk lagere warmtegeleidingscoëfficiënt dan andere bouwmaterialen zoals bijvoorbeeld baksteen en staal. Daardoor vertoont een HSB-wand een hogere **thermische weerstand**. Bij een HSB-wand kan de isolatie tussen de stijlen en regels aangebracht worden, en zo een thermische weerstand bieden die bij traditionele spouwwanden met dezelfde dikte, niet gehaald kan worden. Zo heeft een HSB-wand opgebouwd uit stijlen van 38 op 140 mm, met een laag minerale wol van 140mm dik tussen de stijlen, en aan de buitenzijde voorzien van een spouwblad uit metselwerk, een U-waarde van ongeveer 0.25 W/m^2K. Bij een traditionele

wandopbouw uit metselwerk met dezelfde dikte, is deze waarde dubbel zo groot [42]. Dat maakt dat houtskeletbouw zich goed leent tot een toepassing in laag-energiewoningen en passiefhuizen.

+ De **bouwperiode** is relatief kort. De werf moet niet steeds stilgelegd worden onder invloed van de weersomstandigheden. De **droge opbouw** zorgt ervoor dat na de bouw de droogperiode niet zo lang is als bij traditionele woningbouw. De snelle opbouw kan dan weer doordat (een groot deel van) de constructie geprefabriceerd en geïndustrialiseerd kan worden. Dit kan ten goede komen van de loonkosten. De **prefabricatie** zorgt er eveneens voor dat de kwaliteit van het product hoog ligt aangezien de arbeidsomstandigheden in het atelier over het algemeen beter zijn dan op de bouwplaats.

− De prefabricatie heeft echter ook z'n nadelen. Ze vergt veel **werkvoorbereiding** en organisatie, en na de bouw is een aanpassing niet meer zo eenvoudig uit te voeren. Dit betekent dat de plaatsing van contactdozen, aansluitingen voor toestellen en installaties, ... in een vroeg stadium van het bouwproces al gekozen moeten worden. Voor de mate van de prefabricatie, moet men rekening houden met de afmetingen van de werkplaats en het vervoermiddel. Op de bouwplaats is een goede maatvastheid noodzakelijk. Verwacht wordt dat prefabricatie meer en meer zal toenemen door een stijgend tekort aan geschoold personeel op de bouwplaats, en door tijdsdruk [50].

− Daarbij zijn erg **grote gevelopeningen** niet zo goed in te passen in een houtskeletbouw.

− Het materiaal **krimpt en zet uit** o.i.v. wisselende vochtomstandigheden (en o.i.v. de temperatuur). Dit is vooral te merken bij de vloerelementen en boven-, onder-, stel- en koppelregels van de wanden, aangezien de vormverandering loodrecht op de vezel (dus in de breedte- en dikterichting van balken en regels) het grootst is. De krimp is wel relatief klein, en bedraagt maximaal zo'n 5 à 10 mm per verdieping. De krimp of uitzetting in de richting evenwijdig met de houtvezel, is te verwaarlozen. Dit betekent dat er bijna geen invloed te merken valt op de stijlen van de wanden. In de praktijk houdt men rekening met de krimp vanaf twee verdiepingen. Door thermische uitzetting en zwellen ontstaan inwendige spanningen in het materiaal. Incompatibiliteit met andere bouwonderdelen kan dan tot schade leiden. [31]

+ Ondanks veel vooroordelen ten opzichte van de brandbaarheid van hout, zou een hoge **brandweerstand** toe te schrijven zijn aan de materie. Zo zou een HSB-wand, aan weerszijden bekleed met een dubbele gipskartonplaat, een brandweerstand behalen van minimum 1 uur (Rf 1h). Sinds de jaren '90 doet men ook onderzoek op de brandweerstand van middelhoogbouw in houtskeletbouw. Dit zou de markt voor houtverbruik mogelijk doen verbreden.

− Desondanks zijn er nog altijd veel vooroordelen ten opzichte van houtskeletbouw, niet alleen wat betreft de brandweerstand, maar ook het **risico op aantasting**.

- Enerzijds heeft de **verduurzaming**, die vaak als oplossing wordt gezien om het risico op houtaantasting te beperken, een grote milieubelasting. Op ecologisch vlak is houtverduurzaming dus niet geheel duurzaam.
+ Anderzijds wordt door **verduurzaming** wel de levensduur van een houten element verlengd, waardoor het langer zijn functie kan blijven vervullen. In die zin is het dus wel een duurzame oplossing.
- Sommige platen op basis van hout zijn geproduceerd met formaldehydehoudende **lijmen**. De formaldehyde zou kunnen vrijkomen uit het eindproduct, via kleine gaatjes, beschadigingen, of onafgewerkte oppervlakken. Het toxisch, kleurloos gas kan irritatie aan de ogen veroorzaken, maar ook hoofdpijn, irritatie aan de luchtwegen, ... Omdat de kans bestaat dat ze op lange termijn ook kankerverwekkende stoffen kunnen afscheiden, zijn op de markt ook al alternatieve formaldehydevrije houtplaten beschikbaar. Bovendien zijn sommige lijmen ook milieubelastend.
+ Het materiaal is **onderhoudsvriendelijk**. Mits modern onderhoud kan buitenschrijnwerk bijvoorbeeld heel lange onderhoudsvrije intervals hebben. Terrassen, gevelbekleding en tuinhout hoeven niet per se onderhouden te worden. In tegenstelling tot bij andere materialen, lijken we ook te aanvaarden dat hout aangetast wordt door de natuur.
- Door de beperkte inertie is houtskeletbouw akoestisch niet zo performant. Al geeft de luchtdichtheid wel een verbetering van de **akoestiek**. De akoestische prestaties kunnen verbeterd worden door massa toe te voegen, zoals een zware draagvloer uit beton, of een zwevende dekvloer op een houten roostering. Algemeen gezien vraagt goede akoestiek dus een bijkomende inspanning. Zie ook § 4.4.5.

Een aantal zaken die de aanwending van het HSB-systeem zouden kunnen bevorderen zijn de volgende.

In België neemt de **aandacht** voor **duurzaam en energiezuinig bouwen** de laatste jaren toe. De Vlaamse Overheid levert premies af aan mensen die hun dak isoleren, ze geeft korting op de onroerende voorheffing voor nieuwbouwwoningen met een verlaagd E-peil, ... [74] De strengere regelgeving voor nieuwbouwwoningen stimuleert de mensen om voor grotere isolatiediktes te kiezen, wat de toepassing van HSB ten goede komt. Daarnaast is uit onderzoek gebleken dat het marktaandeel van HSB sinds 2004 met 4.4% is toegenomen (zie § 4.3). De Technische Specificaties worden herzien door de FOD Economie, ... Kortom, er wordt gewerkt aan een draagvlak voor houtskeletbouw.

Zoals in de voor- en nadelen al aangehaald werd, zal de **prefabricatiegraad** vermoedelijk stijgen. Uiteraard zijn er nog andere bouwmethodes waar prefabricatie kan toegepast worden, zoals staalbouw, maar ook houtskeletbouw is hier een geschikte methode voor.

Het WTCB onderzoekt de toepassing van HSB in gebouwen met meer dan 4 verdiepingen. Dit zou de ontwikkeling van HSB in die typologie kunnen stimuleren.

Het aanbod aan hout dat uit duurzaam beheerde bossen komt, neemt over het algemeen toe.

Een paar zaken die dan weer de verdere ontwikkeling van houtskeletbouw in België kunnen belemmeren, zijn de volgende.

Momenteel is het aanbod aan hout in België en dan vooral in Vlaanderen, kleiner dan de vraag. Dit maakt dat wanneer de toepassing van het HSB-systeem nog meer zal toenemen, de voordelen van lokale bosontginning er niet meer zullen zijn. Transport en opslag van hout vraagt extra energie.

In België lijken er tot op heden relatief weinig architectenbureaus en aannemers te zijn die zich volledig op houtskeletbouw toeleggen. De verspreiding van de kennis kan nog heel wat beter; er zijn trouwens nog steeds firma's die het principe van 'hoe meer naar buiten in de schil, hoe meer dampopen' nog niet toepassen.

Voorlopig komt de toepassing van HSB in appartementsgebouwen niet veel voor, aangezien men in België met HSB slechts gebouwen tot 4 verdiepingen bouwt. Gezien de stijgende bevolkingspopulatie, zou men kunnen verwachten dat de vraag naar appartementsgebouwen zal toenemen.

5. Theoretische problematiek van de nieuwe bouwmethode

De laatste jaren ligt de nadruk vanwege het milieu en de hoge energieprijzen niet alleen meer en meer op sterke isolatie, maar ook op voldoende luchtdichtheid. Een goede thermische bouwschil is er immers één die luchtdicht is. De luchtdichtheid verhindert dat er lucht doorheen de bouwschil gaat, maar ook dat er luchtrotatie rond en doorheen de isolatie (wat de thermische weerstand ervan vermindert) en rond de houtstructuur kan plaatsvinden.

Deze nieuwe bouwmethode, waarbij de nadruk op dikke isolatielagen en luchtdichtheid ligt, zorgt ervoor dat nieuwe schadegevallen met het gebruik van hout bestaan. De problematiek is drieledig:

- Een constructie-onderdeel dat per ongeluk bevochtigd zou worden door een eventueel lek of condensatie, kan door de luchtdichte eigenschap niet meer voldoende uitdrogen, met als gevolg kans op ernstige vochtproblemen in lichte gevels en daken. Deze vochtproblemen brengen andere problemen met zich mee op het gebied van aantasting door zwammen of schimmels, esthetische problemen, vervorming, instabiliteit, sterktevermindering, tot zelfs instortings-gevaar. Ook de kwaliteit van het binnenklimaat komt in het gedrang.
- Door de hoge luchtdichtheid verdwijnt natuurlijke ventilatie. Hierdoor zijn de gebruikers van het gebouw op zichzelf en op het ventilatiesysteem aangewezen om een aangenaam en gezond binnenklimaat te realiseren. Een correct gebruik van het ventilatiesysteem is noodzakelijk.
- Door de dikkere isolatiepakketten, wordt de negatieve impact van slecht geconcipieerde bouwknopen groter. Het verschil tussen de temperatuur op binnen- en buitenoppervlak wordt ook groter.

5.1 Dampopen constructie-principe

Volgens Lstiburek's indeling in klimaatzones, heeft België een koud klimaat [17]. Dat wil zeggen dat de gebouwschil beschermd moet worden tegen bevochtiging vanuit de binnenomgeving. Dat kan door een dampremmende en luchtdichte laag te voorzien aan de binnenzijde van de constructie. Zo blijft het vocht aan de warme zijde van de constructie, waar het niet zo gauw zal condenseren. Om de constructie voldoende te kunnen laten uitdrogen, moet de buitenzijde van de schil zo dampopen mogelijk zijn.

Lstiburek stelt verder nog dat de binnenzijde zo dampdicht mogelijk moet zijn. De praktijk heeft echter uitgewezen dat de binnenzijde wel degelijk dampdichter moet zijn dan de buitenzijde, maar niet dampdichter dan noodzakelijk.

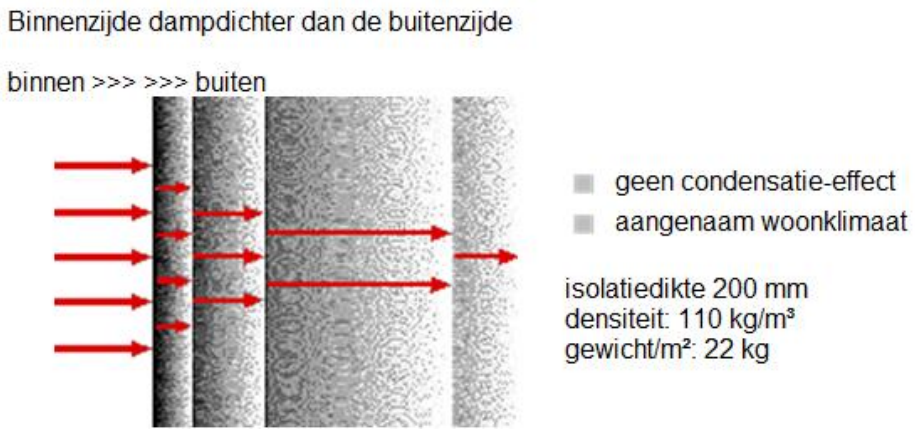


Fig 36 De dampdiffusieweerstand moet dalen van binnen naar buiten(Gutex)

In België is de dampdruk binnen in de winter groter dan de dampdruk buiten. Dan is het risico op condensatie het grootst, aangezien dan het verschil tussen de binnen- en buitendampdruk het grootst is. Indien men het dampremmend luchtscherm aan de binnenzijde van de isolatie plaatst, dan blijft de waterdamp in een warme omgeving, en wordt het risico op inwendige condensatie kleiner. De binnenzijde van de constructie is in de praktijk nooit perfect dampdicht, waardoor warme, vochtige lucht in de constructie kan ontsnappen. Dit zorgt niet alleen voor warmteverlies, maar kan ook condensatie veroorzaken binnenin de constructie, door de spleten waarlangs de vochtige lucht naar buiten migreert.

Dampremmende materiaallagen worden voorzien om de constructie te beschermen tegen waterdamp vanuit de woning. De dampremmende laag wordt dan ook aan de binnenzijde van de constructie aangebracht. De binnenzijde hoeft niet volledig dampdicht te zijn, een dampremmende laag is al voldoende, zolang de dampdiffusieweerstand groter is dan aan de buitenzijde van de schil. Zo kan waterdamp die in de constructie is geïnfiltreerd, ook -zij het in beperkte mate- uitdampen naar de binnenzijde. Indien het dampscherm niet goed wordt uitgevoerd, kan waterdamp toch infiltreren in de constructie, en moeilijk weer uitdiffunderen, vooral indien de buitenzijde eveneens dampremmend werd uitgevoerd, bijvoorbeeld met een OSB-plaat. Het vocht stapelt zich op in de constructie, kan niet snel genoeg uitdrogen naar buiten toe, en kan er condenseren, met schadegevallen als gevolg. Als men aan de buitenzijde echter een dampopen materiaal, bijvoorbeeld houtwolplaat, gebruikt, kan het vocht gewoonlijk geen probleem vormen. De binnenzijde moet wel voldoende luchtdicht zijn, zo niet zouden er te grote hoeveelheden vocht in de constructie kunnen dringen.

Hoe groter de isolatiediktes worden, hoe groter het risico op vocht- en schimmelproblemen in de constructie. Omdat de warmtestroom door de grote isolatiedikte erg klein wordt, is het extra energieverlies ter plaatse van koudebruggen relatief gezien erg hoog. Door het verbeteren van de thermische prestaties van de bouwdelen, neemt de impact van de slecht ontworpen bouwknopen op het warmteverlies immers toe. Dit is te zien in volgende formule [66]:

$$\psi_e = \frac{\phi_{2D}}{L * (\theta_i - \theta_e)} - \frac{U_1 A_1}{L} - \frac{U_2 A_2}{L} \qquad \left[\frac{W}{m * K}\right] \tag{6}$$

Met Φ_{2D} [W]: de totale tweedimensionale stationaire warmtestroom die de binnenomgeving verlaat;

L [m]: lengte waarover de lineaire bouwknoop gemodelleerd wordt;

θ_i-θ_e [K]: temperatuurverschil tussen binnen- en buitenomgeving;

U_i [W/m^{2}K]: warmtedoorgangscoëfficiënt van de scheidingsconstructie tussen binnen- en buitenomgeving;

A_i [m^2]: oppervlakte van de scheidingsconstructie tussen binnen- en buitenomgeving, op basis van buitenafmetingen;

Een verhoging van de isolatiedikte dient dus inherent verbonden te zijn met een goed vakmanschap en ontwerp, om koudebruggen te vermijden. [31]

Hieruit kan men het volgende concluderen:

- De meest dampremmende materialen moeten zich zo ver mogelijk naar buiten bevinden. De binnenzijde mag niet dampdichter zijn dan noodzakelijk, zodat de constructie ook nog naar binnen toe kan uitdrogen.
- Een ononderbroken luchtdichting aan de binnenzijde van de isolatielaag is noodzakelijk.
- Koudebruggen dienen zoveel mogelijk vermeden te worden.
- De best isolerende materiaallagen plaats je best zo ver mogelijk naar buiten, zodat de gebouwschil voldoende warm blijft om inwendige condensatie te voorkomen, en schadeproblemen door bijvoorbeeld vorst, aan de buitenzijde te vermijden.
- Oppervlaktecondensatie kan voorkomen worden door de relatieve vochtigheid in de binnenomgeving laag te houden. Dit kan door voldoende te ventileren, en de vochtproductie te beperken. Daarnaast is het ook belangrijk om plaatsen waarop condensatie kan plaatsvinden, doordat ze een lage oppervlaktetemperatuur hebben, te vermijden. Zo is het belangrijk om slecht geconcipieerde bouwknopen te mijden, en het vertrek voldoende te verwarmen. [77]

5.2 Vochtbronnen

- Continue processen
  - Regen of andere neerslag;
  - Opstijgend grondwater;
  - Hygroscopische eigenschap van een materiaal (bv. hout)
  - Luchttransport;

  - Dampdiffusie;
  - Condensatie: oppervlaktecondensatie en inwendige condensatie

- Uitzonderlijke situaties
  - Lekken in waterleidingen;
  - Overstromingen;
  - Bouwvocht (bv. initieel vochtgehalte van hout en aanmaakwater voor beton);
  - Neerslag ingedrongen in het bouwmateriaal tijdens de constructiefase of tijdens de opslag;
  - Overmatige vochtproductie door verkeerd gebruik.

De eerste groep vochtbronnen kan vermeden worden door constructieve ingrepen, zoals de spouwmuur, de waterkering ter hoogte van de wandaanzet. [51]

Oppervlaktecondensatie kan aanleiding geven tot schimmelaantasting. Ze kan ontstaan ter hoogte van een slecht ontworpen bouwknoop, meestal is dit op plaatsen waar die niet goed kunnen uitdrogen, zoals in hoeken. Achter meubels zoals kasten, kan de temperatuur ook lager zijn, omdat er geen warme lucht achterdoor kan, en omdat de meubels zelf wat isoleren. Inwendige condensatie komt voor binnenin constructies, en bevindt zich meestal op de koude buitenzijde van de thermische isolatielaag.

Bij het wassen, kuisen, baden, douchen, koken, uitademen, ... produceert de mens waterdamp. Indien de vochtbelasting niet voldoende gecompenseerd wordt door ventilatie, kan er oppervlaktecondensatie ontstaan.

Het vocht dat afkomstig is door bevochtiging tijdens de uitvoeringsfase, bv. doordat de constructie bij regenweer niet afgeschermd werd, mag na de uitvoering niet te snel ingesloten worden tussen dampremmende lagen. Het gebouw moet voldoende verwarmd en geventileerd worden om het overtollige vocht af te drijven. De wanden mogen ook niet te snel afgewerkt worden. Soms is er bijkomende ontvochtiging nodig. Op fig. 37 zijn op de hoeken van de wand de wachtfolies te zien die het onbeschutte hout afschermen van bevochtiging. Op de tekening ernaast is te zien waarom het hout op de hoeken aan de ene zijde onbeschermd is. De bouwdelen komen geprefabriceerd aan op de bouwplaats in vrachtwagens. Een overlappend stuk plaatmateriaal dat het constructiehout zou moeten beschermen, zou kunnen afbreken bij het transport.

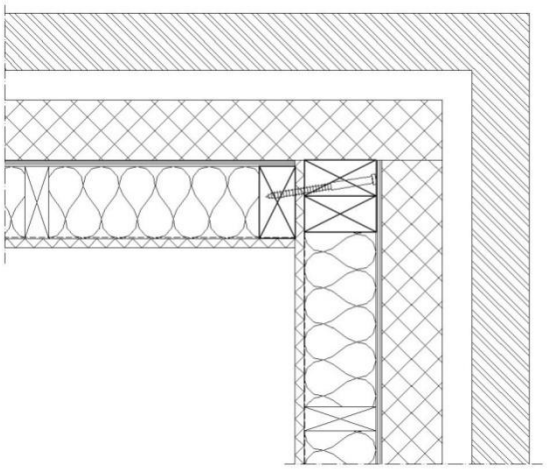


Fig 37 Bij de montage worden wachtfolies voorzien, die het onbeschutte hout (zie horizontale doorsnede op de detailtekening) afschermen (foto bouwplaats Sibomat in Heule; tekening bouwdetail Sibomat)

Een bepaalde hoeveelheid vocht valt te tolereren. Inwendige condensatie heeft niet altijd nefaste gevolgen voor de constructie. Indien het opgestapelde vocht in de zomer weer kan uitdampen, is er geen probleem. Het gebouwconcept en de uitvoering moeten verhinderen dat het vochtgehalte in een bouwmateriaal boven een bepaalde kritische waarde gaat. Dan kan het immers voor schade of een negatieve werking zorgen. Vochtige isolatie is bijvoorbeeld niet meer zo performant als in droge toestand; hout met een vochtgehalte boven 20% kan aangetast worden door houtrot en vervormt te veel, ...

Om inwendige condensatie en oppervlaktecondensatie te vermijden, zijn volgende zaken belangrijk:

- Vochtproductie beperken en ventilatie bevorderen;
- Koudebruggen vermijden;
- Bouwvocht en initieel vochtgehalte van bouwmaterialen beperken;
- Dampdiffusie in de constructie sturen.

5.3 Vochttransport

Vocht migreert van een omgeving met een hoog vochtgehalte (hoge dampdruk) naar een omgeving met een laag vochtgehalte (lage dampdruk)(vochtconcentratiegradiënt). Dit wil zeggen dat in het Belgisch, gemengd klimaat het vocht in de winter (wanneer het binnen vochtiger is dan buiten) van binnen naar buiten migreert. In de zomer gebeurt het omgekeerde.

Het temperatuurverloop doorheen de constructie is afhankelijk van de warmteweerstand van de verschillende lagen. Indien de luchtstroom op een bepaald oppervlak komt met een temperatuur lager dan het dauwpunt[17], kan inwendige condensatie optreden. Koudere lucht kan minder vocht opnemen dan warmere lucht, waardoor de relatieve vochtigheid op een koudere plaats bij hetzelfde vochtgehalte in de lucht, hoger is. De relatieve vochtigheid in een normale, gezonde ruimte bevindt zich tussen 30 en 70%. Buiten kan de RV 100% bereiken, bv. als het regent. Door temperatuurschommelingen of toe- of afname van de hoeveelheid waterdamp, kent de RV voortdurend kleine schommelingen. [4]

5.4 Vocht vermijden

5.4.1 Protection by design

Door een aantal architecturale maatregelen kan de opname van vocht in enige mate begrensd worden, onder andere door een correcte bouwdetaillering en –constructie, door coatings op materialen, en door bouwkundige voorzieningen. Ook houtsoorten met een grote natuurlijke duurzaamheid of verduurzaamde houtsoorten kunnen schimmelaantasting beperken en de levensduur van het materiaal verlengen. [8] Dit zijn bepalende beslissingen die al tijdens de ontwerpfase moeten genomen worden.

Het vocht dat van buitenaf komt, meer bepaald regen, kan beheersd worden door middel van een aantal bouwkundige technieken.

Ten eerste kan men de regen afdrijven van het gebouw, zodat die in de eerste plaats niet op de gevel terechtkomt. Dit kan gemanipuleerd worden door aanpalende gebouwen, beplanting, grote dakoversteken en de dakvorm.

Kubische gebouwen ontvangen veel neerslag in de bovenhoeken en aan de boven- en zijranden van de gevels. Dit wordt verklaard door de plaatselijk hogere windsnelheid. Het water dat op de gevel terechtkomt, is best zo weinig mogelijk geconcentreerd, omdat de regen vlekken veroorzaakt op de gevel. Detaillering in de gevel kan het water op een slimme manier afvoeren met behulp van de zwaartekracht.

Daar waar het water dan toch de gevel raakt, wordt het ofwel direct afgevoerd naar beneden door de zwaartekracht, ofwel wordt het capillair opgezogen of getransmitteerd door kleine gaatjes in de gevelbekleding. Voor capillaire opzuiging moet de muur voldoende dik zijn. Deze techniek werd vroeger vaak gebruikt tegen waterinfiltratie, toen men nog geen spouw gebruikte. Het water verdampt voor het aan de andere kant van de muur komt. Het water dat bij de hedendaags gebruikte spouwmuren toch door de gevelmuur raakt, wordt afgevoerd in de spouw, waar zich aan de buitenkant van de

[17] Bij het dauwpunt is de omgevingslucht verzadigd met waterdamp.

binnenmuur een waterscherm bevindt. Een geventileerde spouw is verbonden met de buitenlucht. Zo kan de luchtdruk in de spouw gecontroleerd worden zodat ze gelijk is aan de luchtdruk buiten, waardoor het water niet naar binnen gezogen wordt. [44]

Zoals reeds vermeld in hoofdstuk 2, is de vormverandering onder invloed van het vochtgehalte het grootst in de richting loodrecht op de vezels. Daardoor zal men ze vooral bij de verdiepingsvloeren ervaren en in de onder- en bovenregels van de skeletwand. De vormveranderingen hebben geen effect op de verticale constructie-elementen, want die bewegen gewoon mee. Er vormt zich bijvoorbeeld wel een probleem bij verticaal gevelmateriaal, dat niet kan meebewegen met de constructiebewegingen. Dit kan opgelost worden door een voeg te voorzien ter plaatse van verdiepingsvloeren. Bij houtskeletbouw is de krimp eerder beperkt ten opzichte van bij houtmassiefbouw.

Omdat vocht makkelijk aangezogen wordt langs het kopse hout (d.i. het houtvlak loodrecht op de vezelrichting), is het belangrijk de uiteinden van balken te beschermen tegen direct contact met vocht.

In het hele gebouw dienen slecht ontworpen bouwknopen vermeden te worden. In een ruimte die, wat betreft de temperatuur en de relatieve vochtigheid, bevorderlijk is voor schimmelontwikkeling, dient men zoveel mogelijk te opteren voor materialen die een weinig tot niet gunstige voedingsbodem vormen voor schimmels. Daarnaast wordt ook aangeraden het oppervlak regelmatig te reinigen, om stof en vuil te verwijderen.

Indien een horizontaal constructiedeel met een grote thermische massa niet geïsoleerd wordt, en bedekt wordt met een vloerafwerking die min of meer isolerend werkt, kan er tussen de vloerbedekking en de constructie schimmel voorkomen. Dit valt te verklaren vanuit het feit dat de massa een dergelijke traagheid heeft, die ervoor zorgt dat de temperatuur bij opwarming van de ruimte, nog niet zozeer is verhoogd. Wanneer dan warme, vochtige lucht doorheen de vloerbekleding gaat, en in contact komt met de koude constructie, treedt er condensatie op. In combinatie met het vuil, eventuele lijmresten en dergelijke, die in en onder de vloerbekleding voorkomen, ontstaat er een gunstige groeiomgeving voor schimmels. [43]

Leidingen voor koud water kunnen condensatie veroorzaken door hun koude oppervlak. Het condensatievocht brengt vochtschade met zich mee op valse plafonds, en wanden waarin de leidingen zich bevinden. Om dit te voorkomen, worden leidingen geïsoleerd met isolatie met open celstructuur, en kan men voor de wanden errond materialen kiezen die minder gevoelig zijn voor intermitterende bevochtiging. [43]

5.5 Gevolgen van vocht

5.5.1 Anisotrope vormveranderingen

Onder invloed van het vochtgehalte zal hout krimpen of zwellen. Zoals eerder al vermeld, gebeurt het werken van het hout met een verschillende waarde naargelang de richting. De vervormingen zijn het grootst in tangentiale richting; in radiale richting zijn ze ongeveer half zo groot.

5.5.2 Zwammen/schimmels

Houtrot is het gevolg van schimmelaantasting, en is het belangrijkste probleem voor houtaantasting van gevels, buitenschrijnwerk en constructie-onderdelen in West-Europa. [4]

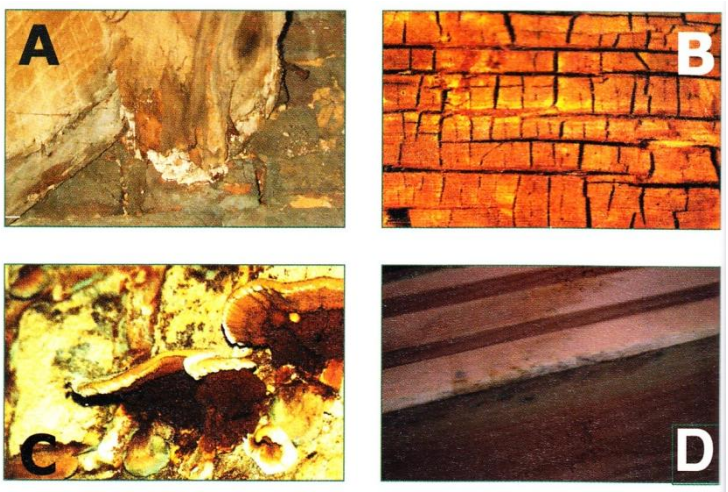


Fig 38 Schimmelaantasting door A: Witrotschimmel, B: Bruinrotschimmel, C: Huiszwam, D: Blauw-schimmel

Er zijn twee soorten schimmels: houtaantastende schimmels of zwammen, en oppervlakteschimmels.

5.5.2.1 Schimmels die de celwand aantasten

De rotschimmels tasten de celwanden van het hout aan, met een verminderde duurzaamheid en draagkracht, en vervormingen tot gevolg. Ze hebben vrij water nodig om de sporen te doen ontkiemen en vereisen een hoog houtvochtgehalte. De droogrotschimmel kan vocht transporteren over de zwamdraden en zo zelfs droog hout aantasten. Droogrot kan zich ontwikkelen bij erg lage houtvochtgehaltes, tot 16%. Bij de afbraak van de cellulosevezels, kan eveneens vocht geproduceerd worden door de schimmel zelf. [31]

Houtaantastende of houtetende schimmels zijn levende organismen en hebben drie groeifasen: ontkieming, groei en voortplanting. Een schimmel plant zich voort door middel van sporen. Onder gunstige omstandigheden ontkiemt de spore van de schimmel. Als de omstandigheden gunstig blijven, begint de schimmel te groeien. Er worden zeer fijne, meestal kleurloze draden gevormd, dit zijn hyfen of schimmeldraden. Het totale, zichtbare netwerk van de zwamdraden wordt het mycelium (of zwamvlokken) genoemd. De 'lagere schimmels' vormen geen vruchtlichamen en tasten het hout niet aan. De 'hogere schimmels', beter gekend als 'zwammen', wel. Eens de schimmel in de vegetatieve fase zit, groeit het mycelium in alle richtingen op en in het houtoppervlak, en neemt hieruit voedingsstoffen op. De voedingsstoffen zijn de koolstofverbindingen in het hout, meer bepaald de lignine en de cellulose. De schimmel verteert z'n voeding door enzymes af te scheiden die het materiaal van de celwand afbreken en die het vrij water in de celholte als diffusiemiddel gebruiken. De afgescheiden stoffen kunnen vlekken veroorzaken op het houtoppervlak. De schimmelgroei kan opgemerkt worden door een onaangename geur.

Door de ontbinding van het hout, ontstaat er massaverlies. Dit is het eigenlijke houtrot. Er is een afname van volumemassa, waardoor de porositeit stijgt en de mechanische sterkte afneemt. Indien de gunstige omstandigheden aanhouden, kan het mycelium ook vruchtlichamen voortbrengen, die zorgen voor de voortplanting van de zwam. Op de vruchtlichamen worden nieuwe sporen gevormd die op hun beurt kunnen ontkiemen. Het houtbederf vindt plaats in enkele weken. Hoe snel het houtbederf plaatsvindt bij fluctuerende omstandigheden, is niet altijd eenvoudig te definiëren.

De meest voorkomende zwammen zijn de huiszwam, de kelderzwam, het elfenbankje, het sterrenkorstje, de bruine poria, de poria vaillantii, en de lenzites. Afhankelijk van het soort zwammen, ontstaat bruinrot, witrot of zachtrot.

Bij bruinrot is er afbraak van cellulose (en hemicellulose) en verdonkert het hout tot een bruine kleur. Het hout krimpt en valt uiteen in kleine kubusjes, daarom wordt het ook wel kubisch rot genoemd. Het hout wordt broos en verpulvert. Onder gunstige omstandigheden tast bruinrotschimmel het hout aan tot diep onder het oppervlak en kan het snel structurele schade aanbrengen. Bruinrotschimmel komt voornamelijk voor op naaldhout. De kelderzwam, huiszwam, poriënzwam en lenzites zijn vaak voorkomende bruinrotschimmels. De huiszwam is de meest schadelijke houtschimmel in België. Ze ontkiemt enkel in niet-verluchte, oude, vochtige gebouwen. De verdere ontwikkeling kan wel bij wisselende, minder vochtige omstandigheden gebeuren, zelfs op droog hout. Haar Latijnse naam, Serpula lacrymans[18], verraadt ook meteen de mogelijkheid tot vochtproductie uit de afbraak van hout, wat verklaart waarom ze ook droog hout kan aantasten.

[18] Lacrymans is Latijn en betekent 'tranend'.

De witrotschimmel kan cellulose en hemicellulose afbreken, maar breekt hoofdzakelijk lignine af. Het hout verbleekt uniform en wordt vezelig. Het elfenbankje en de bruine poria zijn witrotschimmels.

Zachtrot komt voor op continu zeer nat hout, dus normaal niet in de bovengrondse houtconstructies zonder grondcontact die in dit werk behandeld worden. Zowel cellulose, hemicellulose als lignine worden afgebroken. De schimmel tast de celwand aan, en tast het hout aan vanaf het oppervlak naar binnen toe. In het begin wordt dus vooral het oppervlak aangetast, maar op lange termijn kan deze schimmel wel ernstige schade aanrichten door een groot sterkteverlies.

5.5.2.2 Schimmels die de celwand niet aantasten

Daarnaast zijn er ook schimmels die de celwand niet aantasten, de lagere schimmelsoorten. Op zich zijn deze schimmels niet gevaarlijk voor de sterkte van constructies, maar wel voor de menselijke gezondheid. De schimmels kunnen een allergische reactie uitlokken of ademhalingsproblemen veroorzaken bij de gebruikers van het gebouw. Daarnaast zijn de nadelen vooral van esthetische aard. Op het oppervlak en er net onder blijven gekleurde schimmelvlekken achter.

De blauwschimmel ontwikkelt zich in vers hout dat niet voldoende snel gedroogd is. Preventief kan men voldoende droog hout gebruiken, en daarnaast op het gedroogde hout een voldoende dekkende afwerkingslaag aanbrengen. Die afwerkingslaag mag niet op vochtig hout worden aangebracht, omdat dan het vocht wordt ingesloten. De blauwgrijze verkleuring die wordt veroorzaakt door de schimmeldraden, is permanent, en zit soms diep in het houtweefsel. De schimmel komt voor in het spinthout en in het parenchyme.

Oppervlakteschimmels, ook wel houtverkleurende schimmels genoemd, kunnen zich voeden met stoffen op verschillende bouwmaterialen, niet enkel hout, zoals bijvoorbeeld ook gipskartonplaten, behangpapier, verflagen in vochtige ruimtes, ... De schimmels richten geen schade aan, maar gebruiken het oppervlak als draagvlak voor hun ontwikkeling. De schimmel gedijt op een vochtig oppervlak met relatief constante omgevingsfactoren. Door ruimtes regelmatig te verluchten, kan men aldus schimmels voorkomen. Ook slecht ontworpen bouwknopen dient men te vermijden. Om ze te verwijderen, kan men het oppervlak reinigen of borstelen, en eventueel licht opschuren.

5.5.2.3 Voorwaarden voor schimmelontkieming en schimmelgroei

Voor een schimmel kan ontkiemen, moet er aan volgende voorwaarden voldaan worden:

- Er moeten uiteraard sporen aanwezig zijn, en er moet een besmetting zijn.
- Daarnaast is de belangrijkste vereiste dat de schimmel een voldoende hoog houtvochtgehalte heeft tijdens een voldoende lange tijd. Een schimmel komt zonder vocht niet voor.
- De schimmel moet zich op een geschikte voedingsbodem kunnen hechten.
- De luchttemperatuur moet binnen bepaalde grenzen blijven.
- Het substraat mag geen toxische stoffen bevatten.
- Tenslotte moet er voldoende zuurstof zijn, en ook dit voor een voldoende lange periode.

Wordt aan één van deze zes noodzakelijke voorwaarden niet voldaan, dan is er geen ontwikkeling. [52]

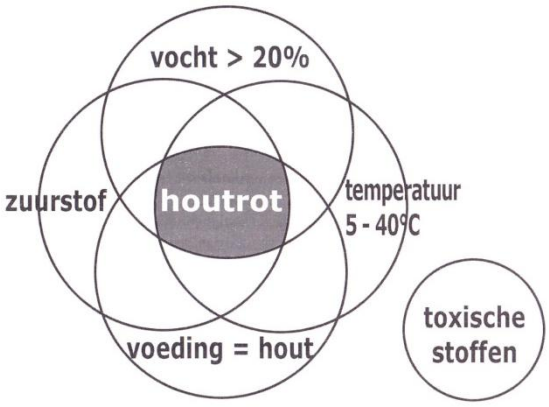


Fig 39 Voorwaarden voor houtrot [4]

Sporen

Sporen zijn altijd aanwezig in de lucht. Ze komen in grote hoeveelheid voor nabij bossen en hun concentratie daalt door neerslag. De sporen worden meegevoerd in de lucht, maar kunnen ook getransporteerd worden door insecten, andere dieren, of door de mens. Met behulp van een luchtdichting, kunnen de schimmelsporen die zich in de constructiematerialen bevinden, zich niet verspreiden naar de binnenomgeving toe.

Voedingsbodem

Onbehandeld vormt het natuurlijke materiaal hout een geschikte *voedingsbodem* voor schimmels. Het is een bron van cellulose en lignine. De zwam tast zowel naald- als loofhout aan. Sommige houtsoorten hebben een natuurlijke bescherming tegen schimmelaantasting, afhankelijk van het aantal en de kwaliteit van hun stofwisselingsproducten (suikers, lipiden,...), opslagstoffen en houtextractieven zoals

harsen, vetten, ... Voedingsstoffen, bv. stikstof, kunnen de ontwikkeling stimuleren, maar beïnvloeden niet de relatieve vochtigheid waarbij de schimmelontwikkeling minimaal zal plaatsvinden. Een dekkende houtafwerking, bevat in elke laag voldoende fungiciden om de duurzaamheid van het hout tegen schimmels te verhogen. Hout dat verzaagd is, wordt minder snel en minder ernstig aangetast dan het oorspronkelijk ovendroog houtoppervlak. Dat zou verklaard worden door het suikergehalte dat bij het ovendroog houtoppervlak hoger ligt dan bij het verzaagd oppervlak [39].

Niet-poreuze materialen zoals glas of kunststof, slaan geen vocht op in hun poriën, terwijl poreuze materialen wel voldoende hygroscopisch vocht kunnen bevatten voor schimmelontwikkeling. Onder de poreuze materialen zijn organische materialen, zoals behangpapier en hout, iets gevoeliger dan minerale materialen zoals baksteen en pleisterwerk. [51]

Eens de spore zich op een geschikte, voldoende vochtige voedingsbodem bevindt, kan ze ontkiemen tot een zwam en verder ontwikkelen. Deze verdere ontwikkeling is nog een tijdje mogelijk op een droog houtoppervlak, omdat de zwam zelf vocht produceert, nodig voor de ontwikkeling. Zo creëert hij een soort microklimaat.

Vochtgehalte van het hout

Schimmelgroei is al mogelijk wanneer het *vochtgehalte* van het hout gedurende een bepaalde periode boven een kritische waarde gaat. Deze waarde verschilt naargelang de schimmelsoort, de temperatuur en de schimmelgevoeligheid van het materiaal. Het is noodzakelijk dat er zich vrij water bevindt in de grote poriën. De ideale vochtomstandigheden zitten aldus boven het vezelverzadigingspunt (25 à 30% vochtgehalte met een gemiddelde van 28%).

De richtlijn die vanaf 1930 gebruikt wordt om schimmelvorming te vermijden, is dat het houtmassavochtgehalte niet langdurig boven 20% mag blijven. In het Belgische klimaat kan men een schimmelaantasting uitsluiten indien het vochtgehalte het kritisch vochtgehalte in totaal niet meer dan 3 à 6 maanden overschrijdt. Drie opeenvolgende maanden waarin het houtvochtgehalte hoger dan 20% is, kan echter wel een belangrijk risico voor schimmelaantasting inhouden.

Onder 18% zal zich normaal geen schimmelaantasting voordoen [4]. Een uitzondering vormt de huiszwam, die zelfs droog hout kan aantasten. Viitanen stelt dat de kritische relatieve vochtigheid bij het houtoppervlak 75 à 80% bedraagt, maar dat schimmelontwikkeling meestal pas plaats vindt boven een relatieve vochtigheid van 90%. Dat komt overeen met een houtvochtgehalte van ongeveer 20%. Het is echter wel zo dat het kritische vochtgehalte voor verschillende schimmelsoorten anders is, en ook afhankelijk is van andere factoren zoals temperaturen, en de blootstellingstijd. [39] Hagentoft stelt dan weer dat de ultieme benedengrens voor schimmelontkieming, wat betreft de relatieve vochtigheid, 62 à 65% bedraagt. Een verzadigde omgeving van 100% is de bovengrens. [31] Een richtlijn volgens Carll en Highley [28] is dat het

vochtgehalte ten allen tijde onder het vezelverzadigingspunt moet zitten, met een bepaalde veiligheidsmarge, uitgezonderd bij vriestemperaturen, en bij korte periodes boven het vezelverzadigingspunt.

Ter plaatse van slecht ontworpen bouwknopen is de temperatuur aan het binnenoppervlak laag, waardoor oppervlaktecondensatie kan ontstaan. Dit vormt samen met een vochtig binnenklimaat een gunstige groeibodem voor schimmels. In de praktijk wordt 80% gebruikt als richtgetal waaronder de relatieve vochtigheid aan het oppervlak moet blijven [51]:

$$\varphi_{si} = \frac{p_i}{p_{sat}(\theta_{si})} < 0{,}8 \tag{7}$$

Met φ_{si} de relatieve vochtigheid aan het binnenoppervlak [-]

p_i de dampdruk van de binnenlucht (Pa)

p_{sat} de verzadigingsdampdruk bij een bepaalde temperatuur (Pa)

θ_{si} de temperatuur van het binnenoppervlak (°C)

Het criterium voor het vermijden van oppervlaktecondensatie, is minder streng dan dat voor het vermijden van schimmelgroei. Oppervlaktecondensatie treedt pas op wanneer de temperatuur aan het binnenoppervlak lager is dan het dauwpunt van de binnenlucht, en de dampdruk de saturatiedampdruk bereikt.

$$p_i \leq p_{sat}(\theta_{si}) \tag{8}$$

De temperatuurfactor moet groter zijn dan 0,70, en dit voor woningen met een normaal gebruik. Dan is de invloed van koudebruggen klein genoeg om bij normaal gebruik van het gebouw, oppervlaktecondensatie en dus ook schimmelvorming te kunnen uitsluiten. [51]

Bij erg wisselende vochtomstandigheden in een ruimte, is de 'time of wetness' van belang, dit is de fractie van de tijd (24u) dat de relatieve vochtigheid in een vertrek een bepaalde waarde overschrijdt [1]. Uiteraard is het belangrijk te weten hoe lang het oppervlak effectief vochtig moet blijven eer er schimmelvorming plaatsvindt, en dus hoe lang het oppervlaktemateriaal vocht ophoudt. Over wisselende omstandigheden is er nog niet zoveel bekend. De omstandigheden waarbij houtbederf plaatsvindt, kunnen ook niet exact bepaald worden, omdat de schimmels zelf ook vocht uitstoten, en dus de vochtigheidsmeting verstoren. Een verdere uiteenzetting over de voorspelling van schimmelontwikkeling, ook onder wisselende omstandigheden, is te vinden in hoofdstuk 6.

Het risico op schimmelaantasting bij permanent wisselende vochtigheid leunt dichter aan bij de werkelijkheid, waarin klimaatschommelingen voorkomen, en er seizoenen bestaan. Indien we de tussentijdse gunstige periodes voor schimmels optellen, dan is de benodigde tijdsduur waarin de gunstige omstandigheden zich voordoen, aanzienlijk langer dan bij constante klimaatomstandigheden. Het houtvochtgehalte in houten constructies schommelt mee met de klimaatschommelingen, en er zijn dus afwisselend periodes van gunstige en ongunstige groei-omstandigheden voor schimmels.

Indien men er geen rekening mee houdt dat er herstelperiodes kunnen zijn, zou in praktisch elke situatie schimmel voorkomen, door het geaccumuleerd effect. In werkelijkheid is dit niet zo. Daarom is het belangrijk dat in onderzoek rekening wordt gehouden met wisselende klimaatomstandigheden.

Zuurstof

Schimmels hebben *zuurstof* nodig om zich te ontwikkelen. Dit impliceert dat ze bijvoorbeeld niet onder water voorkomen, omdat daar het zuurstofgehalte niet voldoende is.

Temperatuur

De ideale *temperatuur* voor schimmels is niet éénduidig bepaald. Volgens het Handboek voor Bouwgebreken [1] is dit 5 à 25°C, terwijl VIBE [4] voorschrijft dat het 5 à 40°C is en Viitanen [39] stelt dat tussen 0 en 50°C schimmelontwikkeling kan plaatsvinden. Die verschillen zijn normaal aangezien de verschillende schimmelsoorten niet dezelfde ideale temperatuurzone hebben. Hagentoft stelt dat de optimale temperaturen voor de groei tussen 20 en 30 °C liggen, temperaturen die ook voor de mens ideaal zijn om in te wonen [31]. Vast staat wel dat de minimale, maximale en ideale temperaturen verschillen naargelang het type zwam. Temperaturen boven 40°C en onder 5°C zijn niet meteen dodelijk voor schimmels, maar de schimmelontwikkeling houdt wel (tijdelijk) op. Uit onderstaande figuur van Viitanen kan worden afgeleid dat de gunstige temperaturen voor schimmelgroei tussen 0 en 50°C liggen, en dat de benodigde relatieve vochtigheid afhankelijk is van de temperatuur.

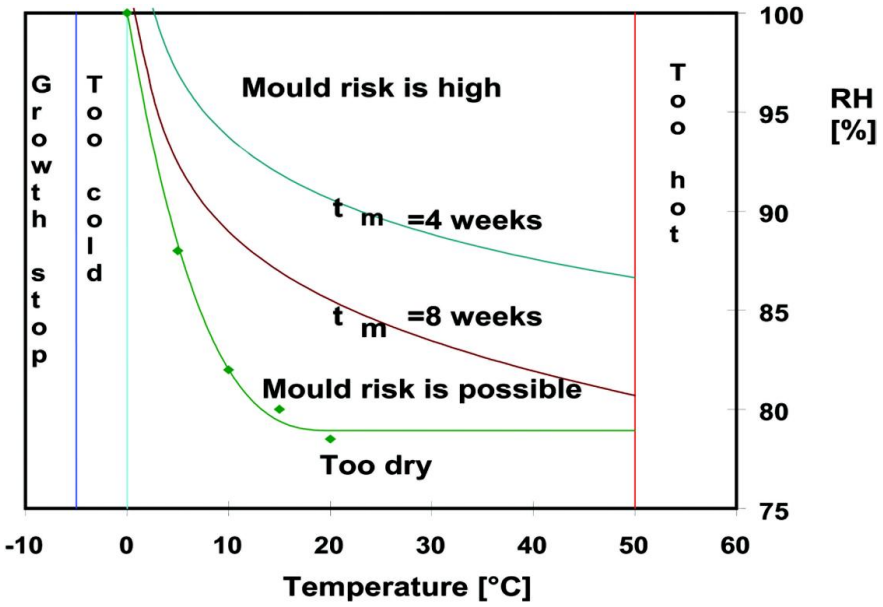


Fig 40 Algemeen diagram met een overzicht van de gunstige omstandigheden voor schimmelgroei op hout(achtige materialen): kritische temperatuur en vochtigheidsgrenzen [39]

De buitenkant van een gebouwschil wordt blootgesteld aan de weersomstandigheden, maar heeft over het algemeen een lage temperatuur en bestaat uit minder schimmelgevoelige materialen. De binnenkant van de schil is gevoeliger voor schimmel. Alhoewel ze niet continu bevochtigd wordt, heeft ze bij normaal gebruik van het gebouw een hoge, gunstige temperatuur voor schimmels, en bestaat ze uit schimmelgevoelige materialen zoals gipskartonplaat of behangpapier.

Toxische stoffen

Een vijfde voorwaarde voor schimmelontwikkeling is dat hout *geen toxische stoffen* mag bevatten. Het hout kan een grote natuurlijke duurzaamheid bezitten, door zelf aangemaakte toxische stoffen. Of het kan chemisch verduurzaamd zijn door de mens, omdat het hout op zich minder duurzaam is. [4]

Licht en zuurtegraad van het hout

Daarnaast zijn voor sommige schimmelsoorten de hoeveelheid *licht* en de *zuurtegraad* van het hout condities die de ontwikkeling kunnen beperken.

5.5.2.4 Curatieve behandeling

Voor de eigenlijke curatieve behandeling kan plaatsvinden, moet een diagnose gesteld worden van de aantasting. Eerst moet de zwam geïdentificeerd worden. Men neemt ook maatregelen om de stabiliteit te verzekeren en men doet een voorafgaand onderzoek.

Het is belangrijk snel maatregelen te nemen, zeker als er reeds schadelijke gevolgen voor de menselijke gezondheid zijn. Indien er nog geen vruchtlichamen te zien zijn, en er dus ook nog geen spoorvorming plaatsvond, is een uitstelling tot 4 à 6 weken

aanvaardbaar. Zijn er echter wel al vruchtlichamen te zien, dan moeten die meteen verwijderd en vernietigd worden door verbranding. Het is belangrijk ervoor te zorgen dat de schimmelsporen of dode lichamen zich niet verder kunnen verspreiden. Daarna kan men starten met de curatieve behandeling.

De behandeling gebeurt volgens het D2-procédé en is doeltreffend voor de huiszwam, de kelderzwam, de Poria Vaillantii, de Poria Vaporaria, de Donkioporia Expansa, de Asterostroma sp. en de Gloeophyllum Trabeum. De curatieve behandeling is niet van toepassing op oppervlakteschimmels en niet-houtaantastende zwammen die in vochtige gebouwen voorkomen en ook weer verdwijnen als het vochtgehalte daalt tot onder een bepaalde waarde.

De schimmels kunnen opgemerkt worden door een muffe geur, en kunnen een indicatie zijn voor een groter vochtprobleem.

5.5.2.5 Schimmelaantasting vermijden

Schimmels moeten vermeden worden omdat ze ziektekiemen verspreiden, allergische reacties kunnen veroorzaken, de duurzaamheid van het hout aantasten, en omdat ze vervormingen en ernstige stabiliteitsproblemen tot gevolg kunnen hebben.

De gebruiker van het gebouw heeft een grote invloed op het al dan niet voorkomen van schimmels. Om schimmelvorming te vermijden, dient men ervoor te zorgen dat er niet voldaan is aan de voorwaarden waarbij schimmels zich voordoen. Sporen en zuurstof zijn aanwezig in elk gebouw, en de temperaturen die comfortabel zijn voor de mens, zijn ook geschikt voor schimmels. De enige voorwaarden waarop de gebruiker van gebouw een invloed kan hebben om schimmelgroei te vermijden, zijn het houtvochtgehalte, de voedingsbodem en de aanwezigheid van toxische stoffen.

Het belangrijkste principe is het gebouw zo te concipiëren dat materialen ten allen tijde droog genoeg worden gehouden om schimmelontwikkeling te bemoeilijken, en indien ze toch bevochtigd worden, voldoende snel kunnen uitdrogen. Om het vochtgehalte onder controle te houden, moet er voldoende geventileerd worden, zeker omdat de gebouwschil luchtdichter is dan vroeger. Een slecht gedrag van de gebruiker van het gebouw kan leiden tot overmatige vochtproductie.

Het hout kan behandeld worden met beschermingsproducten. Sommige producten werken echter maar voor beperkte tijd en de werking hangt ook af van het type schimmel. Indien men opteert voor onverduurzaamd hout, dan dient men door middel van een doordachte detaillering het houtvochtgehalte onder de 20% te houden. Indien de vochtbelasting niet te vermijden is, of het hout niet voldoende kan uitdrogen, kan men ook kiezen voor houtsoorten die van nature duurzaam zijn, of andere bouwmaterialen.

5.5.2.6 Schimmelontwikkeling voorspellen

Om te voorspellen of er zich ergens al dan niet schimmelvorming zal voordoen, zijn er twee instrumenten die men volgens Sedlbauer [56] kan gebruiken: de isopleten en het biohygrothermisch model. In de beschrijving van deze modellen meent Sedlbauer dat aan de drie belangrijkste criteria voor schimmelontwikkeling tegelijk voldaan moet zijn over een voldoende lange periode. Deze criteria zijn de relatieve vochtigheid, de temperatuur en de voedingsbodem.

Isopleten

Een isopleet is een curve die het verband aangeeft tussen schimmelgroei en de hygrothermische omstandigheden. Het isopleet model is een voorspellingsmethode om het risico op schimmelvorming in te schatten voor verschillende combinaties van relatieve vochtigheid en temperatuur. De curves, verschillende naargelang de voedingsbodem, verbinden punten met eenzelfde groeisnelheid of tijd tot ontkieming. De figuur stelt een veilige zone voor, met lage waarden voor relatieve vochtigheid en temperatuur, waarbij het risico op schimmels miniem is, en een onveilige zone, met hoge waarden voor de relatieve vochtigheid en de temperatuur. De lijnen die de veilige en onveilige zone van elkaar scheiden, zijn afhankelijk van:

- De tijdsduur van de klimaatomstandigheden;
- Of spoorontkieming of de groei van zwamvlok/mycelium worden beschouwd;
- Het type bouwmateriaal (voedingsbodem/substraat);
- De schimmelsoort.

Op de onderstaande twee grafieken zijn naast curves die aangeven hoeveel de schimmel per dag groeit, ook limietlijnen (LIM, Lowest Isopleth for Mould) te zien, die de veilige zone afbakenen waarbinnen geen schimmelvorming plaatsvindt. Hoe hoger de temperatuur en de relatieve vochtigheid, hoe groter de groeisnelheid.

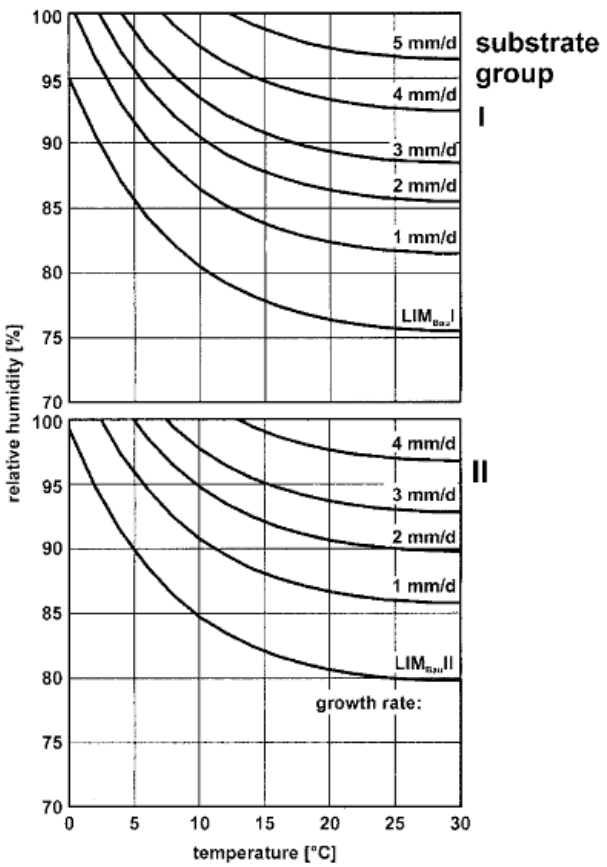


Fig 41 Isopleet systeem voor de groei van de zwamvlokken (mycelium) voor alle schimmels bij een substraat van categorie I (biologisch afbreekbare bouwmaterialen) of categorie II (bouwmaterialen met een poreuze structuur, zoals bepaalde houtsoorten) [56]

Op onderstaande grafiek zijn de hygrothermische voorwaarden af te lezen voor de groei van de schimmels *Aspergillus restrictus* en *versicolor*. De lijnen op de figuur tonen opnieuw de relatie tussen de relatieve vochtigheid en temperatuur en de schimmelactiviteit. Zo heeft een schimmel bij een temperatuur van 20°C en 80% relatieve vochtigheid, 8 dagen nodig om zich te ontwikkelen, terwijl bij een temperatuur van 20°C en 85% relatieve vochtigheid, slechts de helft van de tijd met die omstandigheden nodig is. De curves tonen dat er een drempel is van de relatieve vochtigheid van ongeveer 72 en 74% respectievelijk, waaronder het risico op ontkieming miniem is. Daarnaast situeert de optimale temperatuur zich tussen 25 en 35°C.

Verder worden de schimmels in het isopleetsysteem ingedeeld in risicoklassen naargelang het gevaar voor de gezondheid.

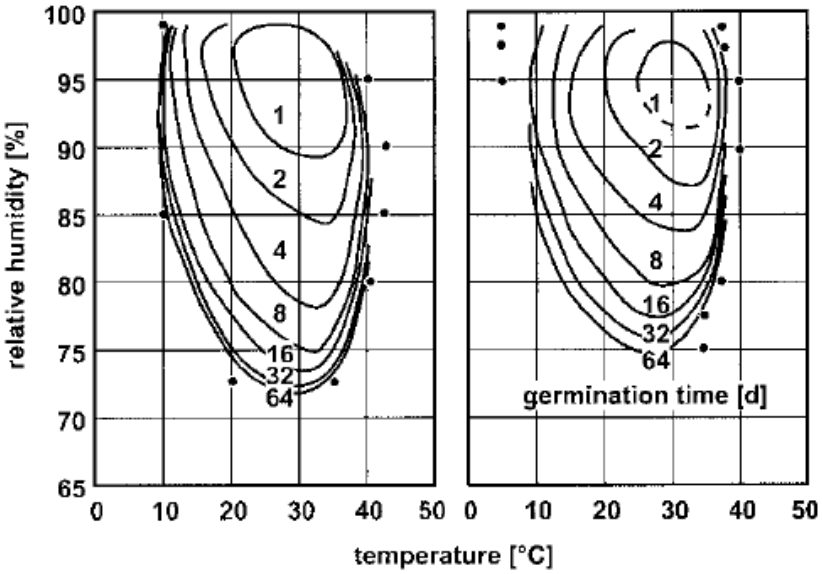


Fig 42 Isopleten voor de ontkiemingstijd van de sporen van de *Aspergillus restrictus* (links) en de *Aspergillus versicolor* (rechts) [56]

Biohygrothermisch model

Het biohygrothermisch model houdt rekening met wisselende omstandigheden, zoals bijvoorbeeld een droogperiode. De vochtigheid van de sporen onder fluctuerende omstandigheden kan ermee bepaald worden. Het model geeft de schaal van de schimmelvorming aan in termen van de grootte van een groeiende schimmelvlek.

De basis van het model is de veronderstelling dat schimmelsporen een osmotisch vermogen hebben rond hun celwand dat hen toelaat om zowel waterdamp uit de lucht op te nemen, als uit materialen, en dat vocht op te slaan.

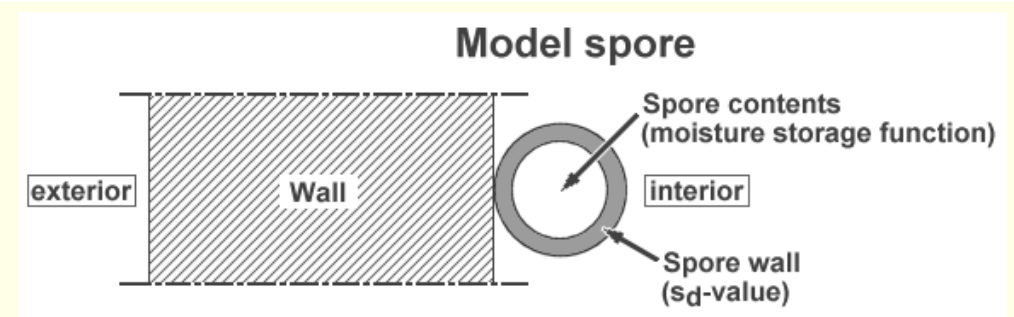


Fig 43 Ontwikkeling van het biohygrothermisch model. Muur met een schimmelspore (heel erg uitvergroot) op het binnenoppervlak [56]

Er wordt aangenomen dat de opname van vocht gebeurt door diffusie doorheen de sporewand. De vochtafhankelijke weerstand tegen diffusie s_d van de sporewand vertraagt de vochtuitwisseling.

De opname gaat door tot de hoeveelheid vocht is bereikt waarbij het metabolisme van de spore kan opstarten. Dit is het vochtgehalte dat niet overschreden mag worden om

geen schimmelvorming te krijgen: ze ligt vast in het Isopleetmodel. De minimum relatieve vochtigheid bij een bepaalde temperatuur is af te lezen op de LIM-curves (Lowest Isopleth for Mould), waarbij gebruik gemaakt wordt van de vochtretentiecurve. Onder deze grens zijn de sporen niet actief.

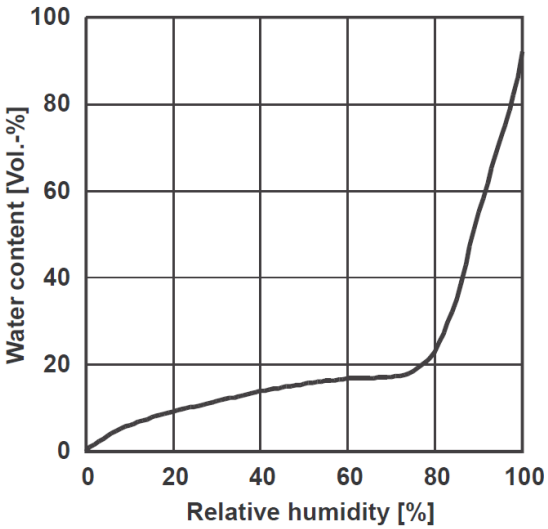


Fig 44 Vochtretentiecurve van de schimmelspore (Krus M., Künzel H.M., Sedlbauer K., Zillig W., A new model for mould prediction and its application on a test roof, II International Scientific Conference on 'The current problems of building)physics in the rural building', Kraków, Polen, november 2001, 19.)

Schimmelindex

Het Viitanen model echter, hanteert een 'schimmelindex', opgebouwd uit zes niveaus om de fractie van het oppervlak te beschrijven dat aangetast is. De niveaus werden bepaald uit empirisch onderzoek en beschreven aan de hand van wiskundige formules. De schimmelindex kan gebruikt worden bij de evaluatie van simulaties: de index geeft het risico op schimmelvorming door om het even welke schimmelsoort op het houtoppervlak.

Index	Growth rate	Description
0	No growth	Spores not activated
1	Small amounts of mould on surface (microscope)	Initial stages of hyphae growth
2	<10% coverage of mould on surface (microscope)	-
3	10%-30% coverage of mould on surface (visual)	New spores produced
4	30%-70% coverage of mould on surface (visual)	Moderate growth
5	>70% coverage of mould on surface (visual)	Plenty of growth
6	Very heavy and tight growth	Coverage around 100 %

Tabel 8 Schimmelgroei-index voor experimenten en simulaties [39]

Een nadeel is dat het model werd gebaseerd op de schimmelontwikkeling op spinthout van dennen- en sparrenbomen, maar niet zomaar kan toegepast worden op andere bouwmaterialen. [39]

In het Viitanen model is het wel mogelijk dat - tijdens ongunstige omstandigheden - de aantasting afneemt, terwijl deze bij het biohygrothermisch model constant blijft. De ontwikkeling is echter beperkt tot het zesde niveau van de schimmelindex, terwijl ze in het biohygrothermisch model onbeperkt zou kunnen blijven toenemen. Uit een onderzoek met WUFI-Bio door Krus en Sedlbauer is gebleken dat er desondanks een goede correlatie is tussen de twee modellen.

Op onderstaande figuur is te zien dat onder wisselende vochtomstandigheden, de schimmelontwikkeling vertraagd is. De groei is sterk afhankelijk van het vochtgehalte en van de blootstellingstijd aan hoge en relatieve vochtigheid.

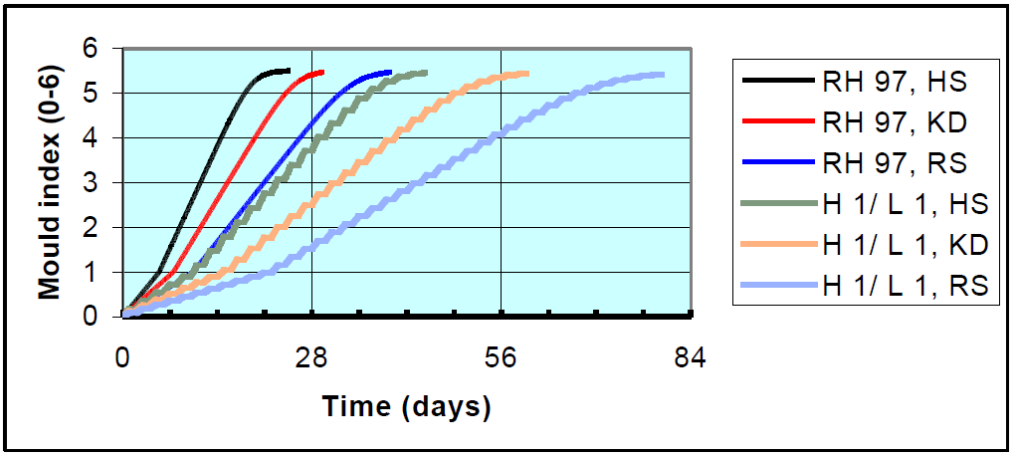


Fig 45 Voorspelling van de schimmelontwikkeling volgens Viitanen op het spinthout van dennenhout bij een constante RV van 97% en bij wisselende vochtomstandigheden (1 dag RV van 97% (High humidity H) en 1 dag RV van 65% (Low humidity L) bij 20°C) Er werden verschillende houttypes gebruikt: HS is hout met veel voedingsstoffen waar schimmelgroei erg actief bij is, KD (kiln dried) is een ovendroog oppervlak en RS (resawn) is een verzaagd oppervlak. [39]

Dosis-reactiemodel

Isaksson et al. [34] stellen een model voor waarbij de mogelijkheid en de tijd tot schimmelontwikkeling voorspeld kan worden bij wisselende klimaatomstandigheden van relatieve vochtigheid en temperatuur, zoals in werkelijkheid in de gebouwschil plaatsvindt. Er werd onder andere onderzoek gedaan naar mogelijke schimmelgroei in microklimaten zoals kruipruimtes en zolders. Daarbij wordt ook rekening gehouden met de weerstand tegen schimmels van de materialen. Men beschouwt de aanvang van schimmelontwikkeling wanneer schimmelsporen zichtbaar zijn onder de microscoop. Het model zou in de praktijk gebruikt kunnen worden als hulpmiddel bij het realiseren van een vochtvrij ontwerp. Het werd gecontroleerd met de resultaten van een soortgelijk onderzoek van Viitanen et al. op de schimmelontwikkeling op het spinthout van spar en den bij blootstelling aan een bepaald klimaat. Isaksson et al. stellen een

dosis-reactiemodel voor, waarmee het begin van schimmelontwikkeling kan bepaald worden. De totale dagelijkse dosis D is dan gelijk aan

$$D = D_{\emptyset}(\emptyset) * D_T(T) \tag{9}$$

met D_{Φ} afhankelijk van een daggemiddelde van de relatieve vochtigheid Φ; D_T afhankelijk van het daggemiddelde van de temperatuur T.

Bij blootstelling gedurende n dagen, is de totale dosis

$$D(n) = \sum_{1}^{n} D_i = \sum_{1}^{n} D_{\emptyset}(\emptyset_i) * D_T(T_i) \tag{10}$$

met Φ_i de gemiddelde relatieve vochtigheid voor dag i (%); T_i de gemiddelde temperatuur voor dag i (°C). De dosis wordt gedefinieerd in relatie tot een bepaald referentieklimaat met Φ_{ref} en T_{ref}, waarbij schimmelontwikkeling aanvangt na N_{ref} dagen. De dosis is gelijk aan 1 voor een dag in het referentieklimaat. De dosis is kleiner dan 1 als de groeicondities minder gunstig zijn dan de referentie groeicondities, en groter dan 1 als de condities meer gunstig zijn. Onder droge omstandigheden en lage temperaturen (veilige zone bij Sedlbauer), wordt de schimmelontkieming/ontwikkeling afgeremd of verhinderd. In dit geval hebben we te maken met een negatieve dagelijkse dosis, dus D is kleiner dan 0. De totale geaccumuleerde dosis kan echter niet negatief zijn. De resultaten van de laboratoriumproeven van Viitanen worden gebruikt om het model te calibreren. Het referentieklimaat heeft een relatieve vochtigheid van 90% en een temperatuur van 20°C. Ook hier wordt een veilig gebied waarbij schimmelontwikkeling kan worden uitgesloten, gedefinieerd: een toestand waarbij Φ<75% en T<0,1°C.

Uit het onderzoek kan besloten worden dat schimmelontwikkeling beduidend kan uitgesteld worden onder snel variërende omstandigheden.

Tenslotte vergelijkt men de groeiresultaten uit de laboratoriumtesten van Viitanen ook met testen uitgevoerd in geventileerde kruipruimtes en met buitenlucht geventileerde zolders. Men stelt telkens 5 teststukken van 50x100mm van 10 verschillende bouwmaterialen bloot aan courante schimmelsporen in de kruipkelders en zolders. De temperatuur en relatieve vochtigheid worden elke 4 uur geregistreerd.

6. Onderzoek

6.1 Bouwknopen

De warmtestroom doorheen de scheidingsconstructies kan berekend worden op basis van de U-waarden van de constructie. Daarnaast is er doorheen de bouwknoop ook een warmtestroom. Deze wijkt af van de warmtestroom doorheen de scheidingsconstructies, en levert een onder- of overschatting van de werkelijke warmtestroom. Voor een buitenhoek wordt de werkelijke warmtestroom overschat. De ψ-waardes zijn dan ook meestal erg negatief. Bij een binnenhoek wordt de totale warmtestroom onderschat, en levert de bouwknoop een positieve ψ-waarde op.

6.1.1 Wetgeving bouwknopen

Vanaf 1 januari 2011 is de nieuwe wetgeving rond bouwknopen van kracht. De invloed van bouwknopen is verplicht in te rekenen in het K-peil en het E-peil van gebouwen

- waarvoor de EPB-eisen voor nieuwbouw gelden én
- waarvoor een stedenbouwkundige vergunning wordt aangevraagd of een melding wordt gedaan vanaf 1 januari 2011.

Het betreffende ministerieel besluit dat de invoeringsdatum vastlegt op 1 januari 2011, werd op 8 december 2010 gepubliceerd in het Belgisch Staatsblad. Hierin staat ook vermeld hoe de bouwknopen moeten ingerekend worden. [74] Vóór de wet werden K- en E-peil onderschat.

6.1.2 Berekeningsmethodiek bouwknopen

Het toepassingsdomein van de berekeningsmethode, zijn alle bouwknopen van een gebouw. Er zijn twee types bouwknopen: lineaire bouwknopen en puntbouwknopen.

Een lineaire bouwknoop is:

> *"elke plaats in de gebouwschil waar 2 scheidingsconstructies van het verliesoppervlak samenkomen, waar een scheidingsconstructie van het verliesoppervlak en een scheidingsconstructie op de grens met een aangrenzend perceel samenkomen of waar de isolatielaag van een scheidingsconstructie van het verliesoppervlak lijnvormig en al dan niet over de volledige dikte onderbroken wordt door een materiaal met een hogere warmtegeleidbaarheid dan de isolatielaag."*

Een puntbouwknoop is:

> *"elke plaats in de gebouwschil waar de isolatielaag van een scheidingsconstructie van het verliesoppervlak puntvormig en al dan niet over de volledige dikte onderbroken wordt door een materiaal met een hogere warmtegeleidbaarheid dan de isolatielaag."* [70]

De warmtestroom die zal optreden doorheen de bouwknopen van een beschermd volume bij een temperatuurverschil van 1K tussen het beschermd volume en de buitenomgeving, en de invloed ervan op het K-peil, mogen op drie manieren ingerekend worden:

- optie A: gedetailleerde methode;
- optie B: methode van de EPB-aanvaarde bouwknopen;
- optie C: forfaitaire toeslag.

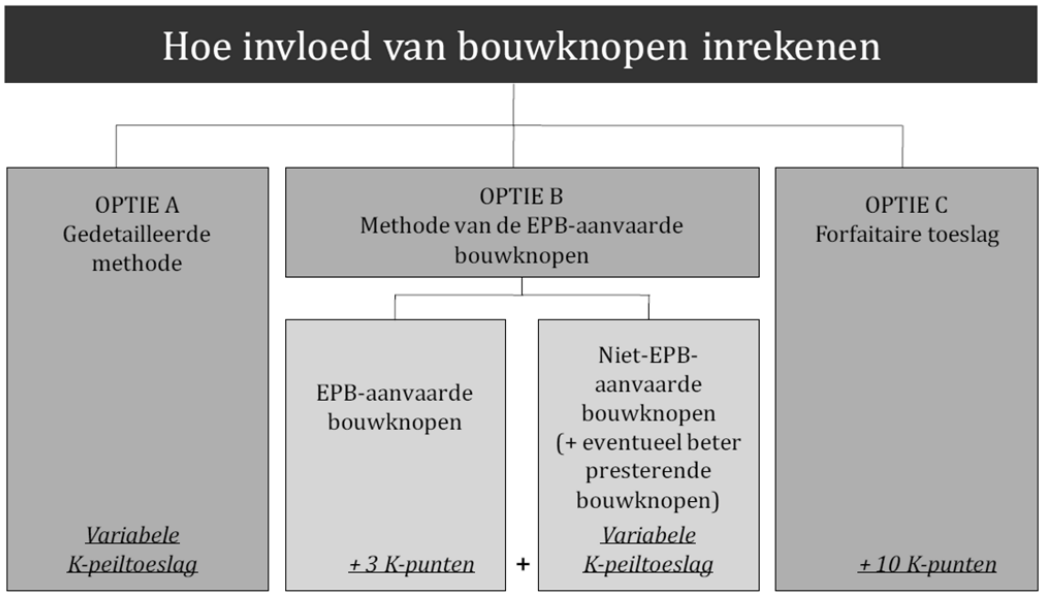


Fig 406 Schema van de drie mogelijke opties om de invloed van bouwknopen in te rekenen en hun impact op het K-peil. [67]

Er mag slechts één methode gekozen worden per K-peil-volume.

6.1.3 Thermische prestatie van bouwknopen

De thermische prestaties van bouwknopen worden gekenmerkt door de lineaire warmtedoorgangscoëfficiënt ψ_e (in W/mK), of de puntwarmtedoorgangscoëfficiënt χe (W/K). De lineaire warmtedoorgangscoëfficiënt geeft een correctieterm per lopende meter detail en per graad temperatuurverschil voor de tweedimensionale invloed van een bouwknoop, bij het berekenen van het ééndimensionale warmtetransport op basis van de U-waarden en de oppervlaktes van de samenkomende scheidingsconstructies. Ze

geeft dus aan welke toeslag men moet aanrekenen op het warmtetransport dat op basis van U-waarden berekend is. De formule is de volgende:

$$\psi_e = \frac{\Phi_{2D} - \Phi_{1D}}{L * (\theta_i - \theta_e)} = \frac{\Phi_{2D}}{L * (\theta_i - \theta_e)} - U_1 * l_1 - U_2 * l_2 \quad \left[\frac{W}{m * K}\right] \tag{11}$$

Met Φ_{2D} [W]: de tweedimensionale, stationaire warmtestroom tussen binnen- en buitenomgeving, berekend met gevalideerde numerieke software, in dit geval Bisco;

Φ_{1D} [W]: de som van de stationaire warmtestromen door de samenstellende scheidingsconstructies van het model, berekend volgens:

$$\Phi_{1D} = \sum U_i A_i (\theta_i - \theta_e) \quad [W] \tag{12}$$

Met Ui [W/m^{2}K]: U-waarde van scheidingsconstructie i;

Ai [m^2]: Oppervlakte van scheidingsconstructie i van het model, op basis van buitenafmetingen.

L [m]: lengte waarover de bouwknoop gemodelleerd wordt;

θ_i-θ_e [K]: het temperatuurverschil tussen binnen- en buitenomgeving. [67]

Slecht ontworpen bouwknopen - vroeger 'koudebruggen' genoemd, hebben niet alleen een invloed op de warmteverliezen, maar brengen ook een lage temperatuur van het binnenoppervlak met zich mee. De temperatuurfactor f is een maat voor de ernst van de slecht ontworpen bouwknoop. Hoe lager de factor, hoe groter de kans op oppervlaktecondensatie en schimmelontwikkeling. De waarden voor de temperatuurfactor zitten tussen 0 en 1.

$$f = \frac{T_{oi} - T_e}{T_i - T_e} \tag{13}$$

Met T_o binnenoppervlaktetemperatuur;

T_e buitenluchttemperatuur;

T_i binnenluchttemperatuur.

De temperatuurfactor is dus onafhankelijk van de desbetreffende randvoorwaarden. De temperatuurfactor is afhankelijk van de U-waarde en de overgangscoëfficiënt van het bouwdeel. Er worden geen eisen gesteld aan de temperatuurfactor in de EPB-regelgeving. Het WTCB stelt dat de temperatuurfactor groter moet zijn dan 0,70, berekend bij een binnen- en buitentemperatuur van respectievelijk 20 en 0°C. Voor de

berekening van de temperatuurfactor dient een warmte-overgangscoëfficiënt αi van 5 W/(m²K) genomen te worden, in plaats van de gebruikelijke 8 W/(m²K)[19].

$$f_{0.2} \geq 0.7 \tag{14}$$

Het suffix in bovenstaande formule verwijst naar de te gebruiken overgangsweerstand bij de berekening (R_{si}=1/5=0.2)

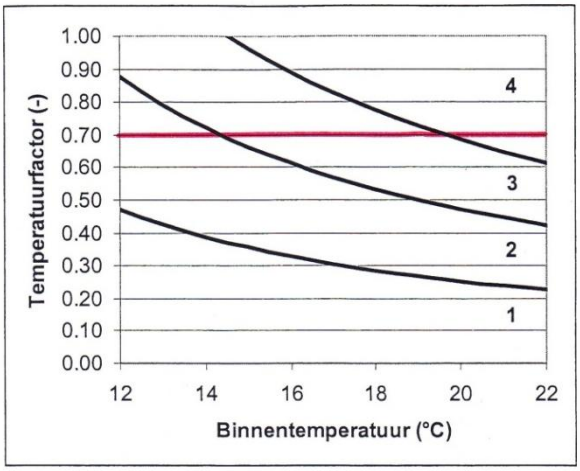


Fig 417 Minimale temperatuurfactor nodig om schimmelvorming te voorkomen, in functie van de binnenklimaatklasse en de gemiddelde binnentemperatuur van een ruimte. Om schimmelontwikkeling te voorkomen, moet de temperatuurfactor groter zijn dan 0.7 (zie rode lijn)[51]

Deze grens biedt geen absolute garantie op het risico op oppervlaktecondensatie, maar is algemeen wel geldig in gemiddelde omstandigheden in woningen met een normaal voorkomend vochtgehalte. [25]

6.1.4 EPB-aanvaarde bouwknopen

Een EPB-aanvaarde bouwknoop, is een bouwknoop die voldoet aan minstens één van de twee volgende voorwaarden:

- De bouwknoop voldoet aan één van de basisregels voor een koudebrugarm detail
- De lineaire warmtedoorgangscoëfficiënt van de bouwknoop is kleiner dan of gelijk aan de van toepassing zijnde grenswaarde: $\psi_e \leq \psi_{e,\,lim}$.

[19] Voor de berekeningen met het softwareprogramma Bisco werd de standaardwaarde van 7,7 W/(m²K) gebruikt.

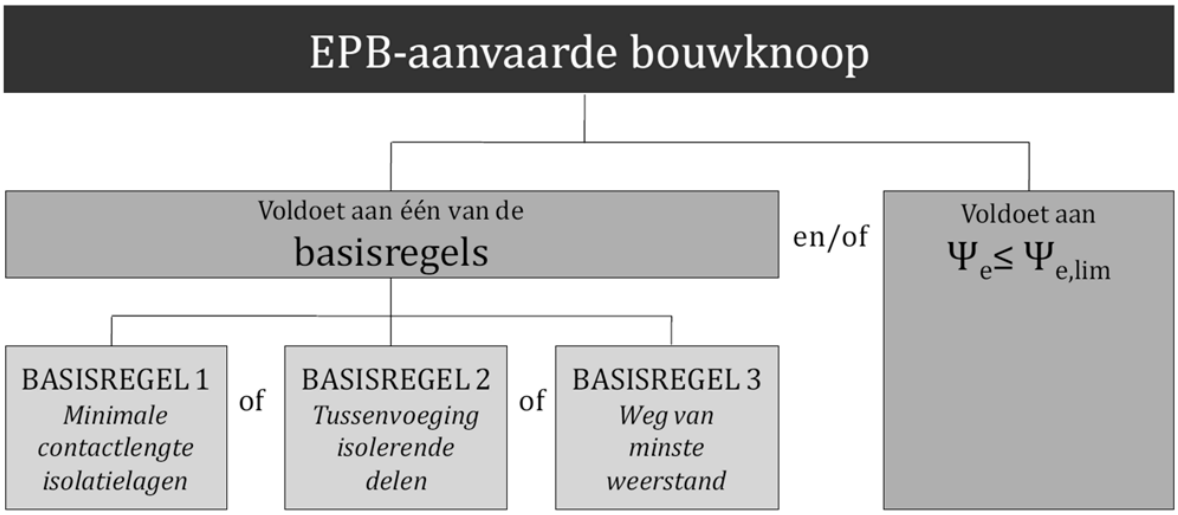


Fig 428 Principeschema voor een EPB-aanvaarde bouwknoop. [67]

6.1.4.1 Typedetails

Beoordeling van de typedetails: EPB-aanvaard?

Met behulp van het softwareprogramma Bisco (§ 6.2) werden de ψ-waardes van de bouwknopen bepaald. De detailtekeningen van de typedetails zijn opgenomen in bijlage 5. In bijlage 2 zijn de resultaten terug te vinden. Hieruit blijkt dat de bouwknopen op één uitzondering na, reeds benoemd zijn als EPB-aanvaarde bouwknopen door te voldoen aan de van toepassing zijnde grenswaarde: $\psi_e \leq \psi_{e,lim}$. Dit wil zeggen dat de detaillering geen aanleiding geeft tot ongeoorloofd warmteverlies, en dat de bouwknoop dus mag beschouwd worden als een 'koudebrugarme' bouwknoop. [67]

	$\Psi_{e,lim}$
1. BUITENHOEKEN (1)(2) • 2 muren • Andere buitenhoeken	 -0.10 W/m.K 0.00 W/m.K
2. BINNENHOEKEN (3)	0.15 W/m.K
3. VENSTER- en DEURAANSLUITINGEN	0.10 W/m.K
4. FUNDERINGSAANZET	0.05 W/m.K
5. BALKONS - LUIFELS	0.10 W/m.K
6. AANSLUITINGEN VAN EEN SCHEIDINGSCONSTRUCTIE BINNEN EENZELFDE BESCHERMD VOLUME OF TUSSEN 2 VERSCHILLENDE BESCHERMDE VOLUMES OP EEN SCHEIDINGSCONSTRUCTIE VAN HET VERLIESOPPERVLAK	0.05 W/m.K
7. ALLE KNOPEN DIE NIET ONDER 1 T.E.M 6 VALLEN	0.0 W/m.K

(1) met uitzondering van funderingsaanzet
(2) Voor een buitenhoek moet de hoek α – gemeten tussen de twee buitenoppervlakken van de scheidingsconstructies van het verliesoppervlak – voldoen aan: 180° < α < 360°.
(3) Voor een binnenhoek moet de hoek α – gemeten tussen de twee buitenoppervlakken van de scheidingsconstructies van het verliesoppervlak – voldoen aan: 0° < α < 180°.

Tabel 9 Grenswaarden voor de lineaire warmtedoorgangscoëfficiënt ψ_e [67]

De berekende lineaire warmtedoorgangscoëfficiënt voor de vier verschillende typedetails is in onderstaande tabel weergegeven. De referentieberekening is in België gebaseerd op buitenafmetingen, vandaar het suffix 'e', van 'exterior'.

typedetails	ψ_e	$\psi_{e,\,lim}$	EPB-aanvaard?
schrijnwerk	0,33	0,1	x
funderingsaansluiting	-0,02	0,05	✓
plat dak	-0,07	0	✓
hellend dak	-0,06	0	✓

Tabel 10 Voldoen de typedetails aan de norm voor EPB-aanvaarde bouwknopen?

Daarnaast kunnen de bouwknopen ook geëvalueerd worden op basis van de drie basisregels voor een koudebrug-arm detail, die echter niet allemaal tegelijk moeten vervuld zijn om te kunnen spreken van een EPB-aanvaarde bouwknoop. Of de typedetails ook aan die basisregels voldoen, wordt verder onderzocht in Bijlage 3.

Kort samengevat zijn dit de resultaten:

- Basisregel 1 is op geen enkel typedetail van toepassing.
- Basisregel 2: enkel plat dak en hellend dak voldoen
- Basisregel 3: is enkel op het typedetail van de funderingsaansluiting van toepassing, maar die voldoet niet.
- Conclusie: enkel de bouwknoop van het schrijnwerk is niet EPB-aanvaard.

Beoordeling van de typedetails: PHP-aanvaard?

Voor het Passiefhuisplatform moet de berekende lineaire warmtedoorgangscoëfficiënt ψ van de diverse aansluitingen kleiner zijn dan 0,01 W/mK. Dan pas kan men spreken van een koudebrugarme bouwknoop volgens passiefhuisnormen. Eigenlijk is dit niet meer dan een opgelegde nauwkeurigheid. Om een PHP-gecertificeerde rekenmethode te hanteren, dienen de randvoorwaarden, die aldus verschillen van deze conform de Gevalideerde numerieke berekeningen, in Bisco aangepast te worden. Zo moeten de oppervlaktes gewijzigd worden (de afstanden gaan tot het buitenvlak van de buitenste isolatielaag; berekeningen per lopende meter). Voor wat betreft de ramen, rekent het Passiefhuisplatform met de overmeten maat, met andere woorden de exacte afmetingen van raam- en deurkaders [45].

typedetails	ψ_e	$\psi_{e,\,lim}$	Koudebrugvrij volgens PHP?
schrijnwerk	0,12	0,01	x
funderingsaansluiting	-0,02	0,01	✓
plat dak	-0,04	0,01	✓
hellend dak	-0,07	0,01	✓

Tabel 11 Voldoen de typedetails aan de normen van het PHP voor een koudebrugarme bouwknoop?

Uit bijlage 2 blijkt dat enkel de bouwknoop van het schrijnwerk niet voldoet aan de PHP-normen om een koudebrugarme bouwknoop te zijn.

6.2 Bisco

De simulaties werden uitgevoerd met het softwarepakket Bisco, versie 9.0w (Physibel Software). Dit computerprogramma berekent het stationair warmtetransport doorheen tweedimensionale objecten met een willekeurige vorm, op basis van de energiebalansmethode.

Volgens de ontwerptekst van 'Gevalideerde numerieke berekeningen' [66], mag de detaillering van bouwknopen in het geval van bouwelementen met een houtskeletstructuur, niet vereenvoudigd worden. Zo moeten de U-waardes, van de scheidingsconstructies die deel uitmaken van de bouwknoop, en die opgebouwd zijn uit niet-homogene bouwlagen volgens het houtskeletprincipe, voor de bepaling van de ψ-waarde, verplicht numeriek berekend worden. In dit werk wordt dit benaderend gedaan, omdat de methode om van een modellering in drie dimensies naar twee over te schakelen, nogal omslachtig is. Bovendien is 3D-software ook niet zo wijdverspreid en toegankelijk als 2D-software.

Er wordt uitgegaan van een binnentemperatuur van 20°C en een buitentemperatuur van 0°C. De warmtegeleidbaarheden van de gebruikte materialen, zijn terug te vinden in het verslag, dat per typedetail gegenereerd werd.

In het tweedimensionale geometrische model van de bouwknoop, moeten de aangrenzende constructie-onderdelen minimaal gemodelleerd worden over een afstand dmin gelijk aan het grootste van 1m en het drievoud van de dikte d van het betreffende constructiedeel. [66]

6.2.1 Vereenvoudigingen aan het geometrisch model

De toegepaste vereenvoudigingen aan het geometrisch model die hier werden toegepast, zijn toegestaan volgens de gevalideerde numerieke berekening [66], die vastgelegd is in een ministerieel besluit. Ze worden hieronder opgesomd:

- Niet-metaallagen met een dikte kleiner dan 1 mm mogen verwaarloosd worden. Dunne metaallagen mogen enkel verwaarloosd worden indien kan aangetoond worden dat ze een verwaarloosbare invloed hebben op de warmtestroom. Voorbeelden zijn bouwfolies, damp-, water- en luchtschermen.

- Elementen die puntsgewijs aan het buitenoppervlak zijn bevestigd en die de isolatielaag niet doorboren, mogen verwaarloosd worden.
  Voorbeelden zijn regenpijpen, dakgoten, ...

- Materiaallagen die zich aan de buitenzijde van een sterk geventileerde luchtlaag bevinden, mag men verwaarlozen in het geometrische model. In dit geval gebruikt men ter plaatse van de sterk geventileerde luchtlaag de warmteovergangsweerstand voor binnencondities, Rsi. Een sterk geventileerde luchtlaag heeft ventilatie-openingen tussen buitenomgeving en de luchtspouw met een totale oppervlakte groter dan of gelijk aan 1500 mm^2/m lengte voor verticale luchtlagen, en 1500 mm^2/m^2 luchtlaag voor horizontale luchtlagen.
  De uiteindelijke bepaling van ψ-waarden aan de hand van de numeriek berekende warmtestroom moet nog steeds met de buitenafmetingen gebeuren, inclusief de materiaallagen die niet gemodelleerd moeten worden in het geometrisch model.
  Voorbeelden zijn een sterk geventileerde spouw tussen het dragend metselwerk en het gevelmetselwerk, luchtspouw tussen pannendak en onderdak, ...

Om rekening te houden met de houtstijlen, die inherent zijn aan een HSB-constructie, kan men een oppervlaktegewogen gemiddelde nemen van de U-waarden van het constructiehout en de isolatie ertussen.

Er kunnen twee methodes toegepast worden om een juiste lineaire warmtegeleidingscoëfficiënt te berekenen. Ofwel neemt men een oppervlaktegewogen gemiddelde van de ψ-waardes die men bekomt door enerzijds een snede doorheen de isolatie en anderzijds een snede doorheen het hout. Ofwel kan men de ψ-waarde berekenen op basis van het oppervlaktegewogen gemiddelde van de λ-waardes van zowel hout als isolatie. De tweede methode is te verkiezen, omdat het logischer is een oppervlaktegewogen gemiddelde te nemen van de warmtegeleidingscoëfficiënten, als materiaal-eigenschap, dan het is om een oppervlaktegewogen gemiddelde te nemen van een eigenschap van het volledige detail.

De relatieve fout tussen deze twee methodes is gemiddeld gezien 0.63, wat zeker niet weinig is. De grote relatieve fout wordt vooral veroorzaakt door de veel te grote relatieve fout bij het typedetail van de fundering, die 1.18 is. Vermoedelijk is deze fout te wijten aan de sequentie van meerdere berekeningen. Voor het typedetail van het plat dak, is de relatieve fout redelijk klein, namelijk 0.03, waaruit men kan besluiten dat de aanname van het resultaat wel goed is.

Een andere grote relatieve fout komt voor bij het hellend dak, die 0.62 is. Daaruit kan men opmerken dat het typedetail niet geschikt is om te simuleren via deze methode, en dat men geen goede aanname kan doen voor het hellend dak. De reden voor de grote relatieve fout ligt waarschijnlijk in het feit dat het typedetail van het hellend dak nogal complex is. Om een meer nauwkeurige ψ-waarde te verkrijgen, zou men het hellend dak kunnen simuleren in drie dimensies. Maar het 3D-softwarepakket Trisco, eveneens van Physibel, werkt vooral goed voor objecten die loodrecht op mekaar staan. Het is niet eenvoudig om er hellende daken in te modelleren, aangezien die schuine vlakken bevatten. De reden waarom in dit werk gekozen werd voor Bisco, is omdat het gebruiksvriendelijker is dan Trisco, waardoor men minder rap fouten zal maken. De waarden zorgen er bij beide methodes echter bij drie van de vier typedetails voor dat de bouwknopen EPB-aanvaard zijn, waardoor we geen aanpassingen hoeven te doen aan het typedetail op thermisch niveau.

Een schatting van de relatieve fout die Bisco maakt, is 0,001%. Dit is kleiner dan 0,0001, wat de relatieve fout voldoende klein maakt, om te kunnen veronderstellen dat de verkregen berekeningen in Bisco betrouwbaar zijn.

6.2.2 Rekenmethode

6.2.2.1 Funderingsaanzet op volle grond

De lijnwarmtedoorgangscoëfficiënt voor het typedetail funderingsaanzet is gelijk aan:

$$\psi_e = \frac{\phi_{2D}}{L * (\theta_i - \theta_e)} - \frac{A_1 U_1}{L} - \frac{\phi_{2D,a}}{L * (\theta_i - \theta_e)} \quad \left[\frac{W}{m.K}\right] \tag{15}$$

Met:

Φ_{2D} [W]: de totale tweedimensionale stationaire warmtestroom die de binnenomgeving verlaat, berekend met gevalideerde numerieke software;

L [m]: lengte waarover de lineaire bouwknoop gemodelleerd wordt;

θ_i-θ_e [K]: temperatuurverschil tussen binnen- en buitenomgeving;

A_1 [m]: oppervlakte van de muur tussen binnen- en buitenomgeving, op basis van buitenafmetingen;

U_1 [W/m^{2}K]: warmtedoorgangscoëfficiënt van de muur;

$\Phi_{2D,a}$ [W]: de totale tweedimensionale stationaire warmtestroom die de binnenomgeving verlaat, berekend met gevalideerde numerieke software, op basis van het model dat als volgt moet worden aangepast:

Bij de eerste simulatie wordt de werkelijkheid gesimuleerd. Bij het model dat in de tweede simulatie wordt toegepast, verwaarloost men het funderingsmassief, en wordt het vervangen door grond met een warmtegeleidbaarheid van 2 W/mK. De buitenwand wordt vervangen door een adiabatische constructie. Dit kan je doen door de λ-waarden van het volledige gevelpakket gelijk te stellen aan 0. Zo verkrijgt men het warmteverlies door de vloerplaat.

6.2.2.2 Schrijnwerk

Voor de simulatie van het typedetail vensteraansluiting, gebruiken we een vereenvoudigde rekenmethode. Het raamprofiel mag vervangen worden door een homogeen, rechthoekig blokje met dezelfde warmtedoorgangscoefficiënt U_f als het werkelijke raamprofiel. De U-waarde van het betreffende raamprofiel is 1,3 W/m^{2}K. De warmtegeleidbaarheid λ'_f wordt zo bepaald:

$$\lambda'_f = \frac{a}{\frac{1}{U_f} - R_{si} - R_{se}} \qquad \left[\frac{W}{m.K}\right] \tag{16}$$

De beglazing en afstandshouders worden niet gemodelleerd. Het homogeen blokje bevindt zich op dezelfde positie als het betreffende raamprofiel. [66]

6.3 WUFI

De biohygrothermische software werd ontwikkeld door het Fraunhofer Institut für Bauphysik in Holzkirchen (Duitsland). WUFI simuleert tegelijk het warmte- en vochttransport doorheen de wand (ééndimensionaal). Naast WUFI bestaan er nog andere dynamische simulatieprogramma's.

6.3.1 Verschillen met de Glasermethode

De Glasermethode wordt gebruikt om het stationair niet-isotherm damptransport in een samengestelde wand te bepalen. Zo kan men nauwkeurig aangeven op welk scheidingsvlak tussen materialen in de wand condensatie optreedt. Daar is de temperatuur lager dan het dauwpunt van de lucht. De Glasermethode heeft echter een aantal beperkingen:

- De voor de berekening gebruikte binnen- en buitentemperatuur en -dampdruk zijn jaargemiddelde waarden, en worden dus constant (stationair) verondersteld. De werkelijkheid is dynamischer en aldus complexer.
- Capillaire invloeden worden niet in rekening gebracht, enkel het damptransport door diffusie. Het feit dat vocht in werkelijkheid doorheen het materiaal kan bewegen, en kan verdampen, wordt dus niet beschouwd. Dit wil zeggen dat voor poreuze materialen, de hoeveelheid condensvocht overschat kan worden.
- De invloed van opwarming door zonstraling wordt niet beschouwd. Hierdoor beoordeelt men de situatie eveneens ongunstiger dan ze in werkelijkheid is.
- De warmtegeleidingscoëfficiënt van een materiaal wordt constant verondersteld, ongeacht de invloed van de temperatuur en het vochtgehalte.
- De condensatiewarmte, die bij condensatie vrij komt, en die het temperatuursverloop kan beïnvloeden, wordt niet in beschouwing genomen. [55]

Dynamisch damptransport zoals aan de basis ligt van het simulatieprogramma WUFI, beschrijft beter de werkelijkheid. WUFI houdt bij de simulaties verder ook rekening met:

- zonstraling, slagregen en nachtelijke uitstraling
- capillair én diffuus vochttransport
- verdampingswarmte (positief) en condensatiewarmte (negatief)
- de invloed van temperatuur en vocht op thermische geleiding. [55]

De simulatie van warmte- en vochttransport in luchtlagen, wordt door WUFI niet beschouwd. Het programma werd immers ontwikkeld voor de simulatie in poreuze bouwmaterialen, en de twee- en driedimensionale processen in een luchtspouw (convectie, turbulentie), kunnen niet correct nagebootst worden in een ééndimensionaal programma. Daarom wordt de geventileerde luchtspouw uit de typedetails benaderd door een poreuze materiaallaag. De moisture storage function van een poreus materiaal

is een erg ruwe benadering van die van een luchtlaag. Ze is immers grotendeels onafhankelijk van de temperatuur, waardoor het materiaal de moisture storage function van de luchtlaag, die afhankelijk is van temperatuur en relatieve vochtigheid, niet kan nabootsen.

Het voordeel ten opzichte van de Glasermethode, is dat slagregen, capillair transport, vloeibaar watertransport, ... ingerekend kunnen worden. De Glasermethode is ook ééndimensionaal, net als WUFI. Het simulatieprogramma bestaat ook in een tweedimensionale versie, maar die was niet beschikbaar. De versie die in dit werk gebruikt wordt, is WUFI 4.1 Pro, en de postprocessor WUFI-Bio 3.0.

6.3.2 Testmethode

De invoergegevens die bij de simulatie gebruikt werden, zijn de volgende. De warmteovergangsweerstand aan het binnenoppervlak, respectievelijk buitenoppervlak, R_{si} en R_{se}, hebben dezelfde waarde als voor de berekeningen van de ψ-waardes van de typedetails, namelijk 0,13 en 0,04.

WUFI wordt gebruikt om het simultane warmte- en vochttransport te berekenen in ééndimensionale meerlagige gebouwdelen. Voor de berekening van het warmtetransport worden volgende zaken in acht genomen:

- thermische conductie
- enthalpiestromen door vochttransport met faseverandering
- kort-golvige zonnestraling
- afkoeling door langgolvige straling tijdens de nacht

Convectief warmtetransport wordt achterwege gelaten, alsook convectief vochttransport, aangezien het nogal moeilijk is om te quantificeren, en zelden ééndimensionaal. [85]

6.3.3 Invoergegevens

6.3.3.1 Opbouw wand

WUFI beschikt over een database met een groot aantal standaard bouwmaterialen. De meeste materialen die in de HSB-wand gebruikt worden, kunnen zonder meer worden overgenomen; andere worden gebaseerd op standaardmaterialen, en dan aangepast zodat de eigenschappen overeenkomen met die van het gewenste materiaal.

Voor elke materiaallaag worden de dikte en het materiaal ingegeven. De opbouw van de HSB-constructie ziet er als volgt uit:

Van buiten naar binnen:

- metselwerk (d=0.095m, λ=0.6 W/mK)

- 'luchtlaag' (d=0.04m, λ=0.23 W/mK)
- houtwolplaat (d=0.018m, λ=0.049 W/mK)
- constructiehout/minerale wol (d=0.18m, λ=0.15 W/mK of 0.035 W/mK (of 3 W/mK aangepast aan temperatuur t.p.v. bouwknoop))
- durélisplaat (d=0.012m, λ=0.13 W/mK)
- leidingspouwhout/minerale wol (d=0.06m, λ=0.15 W/mK of 0.036 W/mK (of 2 W/mK aangepast aan tempeatuur t.p.v. bouwknoop)
- duragyp (d=0.015m, λ=0.21 W/mK)

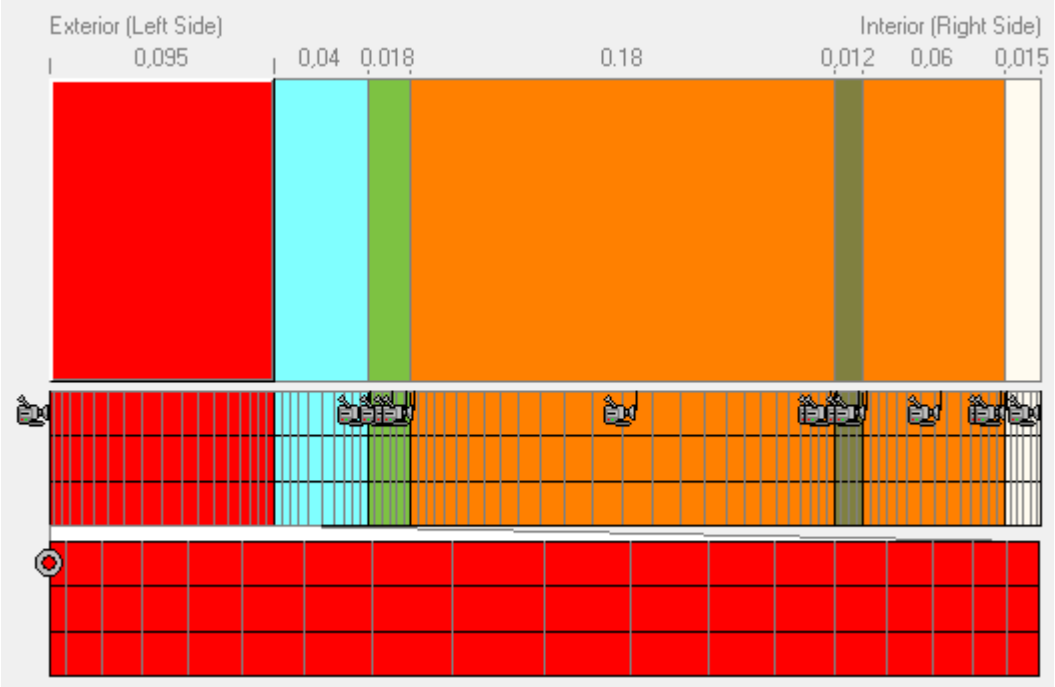


Fig 49 Verticale doorsnede wandopbouw in WUFI

In het rooster dat onderaan op de figuur te zien is, kan gekozen worden op welke plaatsen in de materiaallaag een monitor, een warmtebron of een vochtbron gewenst is. Na de simulatie, kunnen voor de monitorposities dan grafieken voor de temperatuur en de relatieve vochtigheid in functie van de tijd, en isopleten gegenereerd worden.

6.3.3.2 Oriëntatie van de wand

Voor een eengezinswoning, lijkt een hoogte van de wand van kleiner dan 10m geschikt. We nemen aan dat de wand zuid-westelijk georiënteerd is, wat in België overeenkomt met de grootste vocht- en windbelasting.

6.3.3.3 Initiële omstandigheden

De initiële vochtgehaltes van de bouwmaterialen worden ingesteld als het typisch bouwvochtgehalte dat het materiaal bevat.

6.3.3.4 Klimaat

Om de blootstelling van een oppervlak aan het buitenklimaat zo goed mogelijk te simuleren, worden volgende randvoorwaarden als metereologische data in WUFI ingebracht: temperatuur, relatieve vochtigheid, neerslag en zonstraling.

Het buitenklimaat

De prestatie wordt gesimuleerd aan de hand van klimaatbestanden afkomstig van het weerstation Armand Pien van Universiteit Gent. Klimaatdata van andere instituten zijn erg moeilijk verkrijgbaar. Ondanks de onvolledigheid van bepaalde data, is het uiteindelijk, samengesteld klimaatbestand toch een goede weergave van de werkelijke klimatologische toestand in België, althans wat de eerste indruk betreft. Met behulp van de WUFI 'Create Climate File'-tool, die in het WUFI-pakket beschikbaar is, kan men zelf een *.kli file creëren. WUFI beschikt daarnaast reeds over klimaatdata van steden in Canada, de VS, Scandinavië, Portugal, Frankrijk, Zwitserland, Oostenrijk, Duitsland en Polen.

De waarden van de buitentemperatuur, T_e, zijn afkomstig uit het referentieklimaat. De waarden van de relatieve luchtvochtigheid in binnen- en buitenomgeving, zijn gebaseerd op het referentieklimaat uit Gent in de periode 2006 - 2020. De lange tijdsspanne van 15 jaar (1 januari 2006 - 31 december 2020) is nodig om het vochtgehalte in de bouwschil tot een evenwicht te laten komen. Ze is gebaseerd op de klimaatgegevens van 1 jaar, 15 keer na elkaar gesimuleerd. Per tijdsstap van 1h worden de hygrothermische omstandigheden gesimuleerd.

Na de eerste simulatie (zie verder) blijkt dat het zelf opgestelde weerklimaat een onrealistische voorstelling geeft van het totale vochtgehalte in de bouwschil.[20] Dit is waarschijnlijk te wijten aan het feit dat:

- De relatieve vochtigheid buiten niet rechtstreeks gemeten wordt, maar a.d.h.v. een natteboltemperatuur berekend wordt. Als het vriest, bevriest het water dus en is de meting van de natteboltemperatuur verstoord.
- Er waren ook een paar storingen en computerproblemen.
- Sommige toestellen, bijvoorbeeld om de (diffuse en directe) zonstraling te meten, waren niet nauwkeurig geijkt.
- Het toestel om de zonstraling te meten, staat op een andere locatie in Gent dan de sterrenwacht, waar de overige parameters gemeten worden. Dit zou de correlatie tussen de verschillende parameters kunnen beïnvloeden, al zal het verschil wel niet zo groot zijn.

[20] De totale neerslaghoeveelheid bedroeg volgens WUFI 2308 mm, wat bijna drie keer zoveel is als de normale totale neerslaghoeveelheid in België, volgens het KMI. Indien we instellen in WUFI dat er geen regenwaterabsorptie is, zijn de resultaten ook veel aannemelijker.

Het is dus beter te opteren voor een klimaatbestand van een klimaat dat goed lijkt op het Belgische, en dat wel in de databank van WUFI is opgenomen. De dichtsbijzijnde stad is het Duitse Kassel, op zo'n 480km afstand van Ukkel. Om veilig te werken, wordt een inschatting gemaakt van het verschil tussen beide klimaten (zie bijlage 4). Uit de vergelijking blijkt dat het klimaatbestand van Kassel voldoende geschikt is voor het Belgische klimaat. Kassel heeft net zoals België een koelgematigd klimaat met een zachte winter. Na 5 jaar lijkt het vochtgehalte een evenwicht te hebben gevonden, waardoor we kunnen simuleren over de periode 2006 - 2010.

Het binnenklimaat

Het binnenklimaat wordt beschreven d.m.v. de Europese standaard EN 13788. De binnentemperatuur T_i is constant, en is ingesteld op 20 °C. De relatieve vochtigheid binnen wordt door middel van een algoritme bepaald vanuit de relatieve vochtigheid buiten, door een variabele vochtlast afhankelijk van de temperatuur buiten. Er wordt gebruik gemaakt van binnenklimaatklasse 3, voor gebouwen voor intensief gebruik, zoals kleine sociale woningen, appartementen, ... aangezien dit veiliger is dan te rekenen met klimaatklasse 2, met een beperkte vochtproductie. Normaal zou de vochtbelasting in residentiële gebouwen kleiner moeten zijn dan $4g/m^3$, dit correspondeert met binnenklimaatklasse 1 of 2.

6.3.3.5 Initieel vochtgehalte bouwmaterialen

Er wordt een typisch initieel vochtgehalte ingesteld per bouwmateriaal, bepaald door WUFI zelf. Dit benadert de werkelijkheid en is relatief ongunstig.

De andere randvoorwaarden voor de simulatie, zijn standaardwaarden uit WUFI.

6.3.4 Uitvoergegevens

WUFI genereert een grafiek van het vochtgehalte in functie van de tijd. Indien het vochtgehalte jaar na jaar lijkt te stijgen, is er een risico dat het vocht accumuleert in de wand, en dat er schade optreedt wanneer de verzadigingsgrenswaarde bereikt wordt.

Een numerieke waarde van het totale vochtgehalte van een constructieonderdeel, is in het geval van deze verhandeling zinloos, aangezien ze afhankelijk is van eigenschappen (o.a. de dikte van de lagen en de materiaaleigenschappen) van de specifieke onderzochte constructie. Ze vergelijken met de waarden van andere constructies is dan ook niet veelzeggend, enkel de lange-termijnresultaten hebben betekenis. [85]

Bijkomend aan het totale vochtgehalte in de wand, wordt voor elke materiaallaag het absolute vochtgehalte gegeven in functie van de tijd. Deze numerieke waarde voor het vochtgehalte per materiaallaag is wel betekenisvol. Het is niet omdat het vochtgehalte in de volledige wandopbouw een dynamisch evenwicht bereikt heeft, dat dit voor alle

materiaallagen ook het geval is. Voor elke materiaallaag moet dus ook nagegaan worden of het dynamisch evenwicht bereikt wordt.

Indien het vochtgehalte gedurende een lange periode erg hoog blijft, kan dit het materiaal schaden, en de isolerende eigenschappen ervan doen afnemen. Voor hout of houtachtige materialen, mag het vochtgehalte bijvoorbeeld niet boven de richtwaarde van 20 % uitstijgen gedurende een langere periode, omdat dit een reëel risico op schimmelgroei of houtrot inhoudt. Isolatiematerialen mogen bijvoorbeeld geen al te hoge vochtgehaltes bevatten, omdat die de performantie van de isolatie doet afnemen (de λ-waarde van een vochtig materiaal is hoger dan van een droog materiaal). Materialen aan de buitenzijde van de constructie, mogen eveneens niet te vochtig zijn, omdat ze in de winter vorstschade zouden kunnen oplopen. De fabrikanten van de bouwmaterialen schrijven voor wat de mogelijke grenswaarde is.

Ekstrand-Tobin et al. stellen de volgende algemene kritische niveaus voor het vochtgehalte voor [30]:

materiaal	**kritisch niveau RV [%]**
hout en houtachtige materialen	75-80
gipskartonplaat	80-85
minerale isolatie	90-95
EPS	90-95
beton	90-95

Tabel 12 Kritische niveaus vochtgehalte voor propere bouwmaterialen. Indien de bouwmaterialen vuil zijn, verlaagt het kritisch vochtgehalte tot 75-80% [30]

Met behulp van WUFI kan men nagaan of in een bepaalde situatie tegelijk een hoge temperatuur en een hoge relatieve vochtigheid optreden, wat op bepaalde materialen aanleiding kan geven tot gunstige groei-omstandigheden voor schimmels. Voor de hygrothermische omstandigheden aan het binnenoppervlak, die zich onder de isopleetcurves voor schimmelgroei bevinden, kan men besluiten dat schimmelontwikkeling uit te sluiten is. Voor omstandigheden die zich gedurende langere tijd boven de curves bevinden, kan men daarentegen niet uitsluiten dat er een risico op schimmelontwikkeling is, maar dat betekent niet noodzakelijk dat er effectief schimmelontwikkeling zal optreden. Met WUFI kan niet onderzocht worden of schimmelontwikkeling zich kan voordoen op het buitenoppervlak van de constructie, aangezien de toestand er beïnvloed wordt door het buitenklimaat. Zelfs zou er een gunstige groeimogelijkheid zijn voor schimmels, dan nog zou het klimaat dat zeer waarschijnlijk belemmeren.

6.3.5 Resultaten

De grafische uitvoer van WUFI, kan geëxporteerd worden om overzichtelijk voor te stellen in Excel. Aangezien het aantal gegevens over de 5 jaar (> 43000) groter is dan de capaciteit van Excel, nemen we per dag een gemiddelde waarde.

WUFI berekent de temperaturen en vochtgehaltes in de bouwschil en op het binnenoppervlak. Met behulp van de prestatiecriteria waaraan het simulatiemodel moet voldoen, kan dan bepaald worden of er schimmelontkieming of -ontwikkeling zal voorkomen, en of de vereisten voor koudebrugwerking gehaald worden. [31]

6.3.5.1 Evaluatie van de resultaten

Om de duurzaamheid te bepalen, kan men gebruik maken van kritische niveaus, waaronder geen degeneratie plaatsvindt. Een paar algemene duurzaamheidscriteria waar moet op gelet worden, zijn de volgende:

- Het vochtgehalte in een laag mag in de loop van de tijd niet blijven stijgen. Dit wil immers zeggen dat het vocht zich ophoopt in de laag of in de constructie.
- Voor materialen die in contact komen met vocht, moet nagegaan worden of het vochtgehalte gedurende een lange tijd boven een bepaald waarde stijgt waardoor schade wordt toegebracht. Voor hout bijvoorbeeld mag het houtvochtgehalte de grens van 20% niet overschrijden gedurende een langere periode. Vorstschade komt voor in een materiaal wanneer het vochtgehalte zich dicht bij het verzadigingspunt bevindt. [85]

Indien over bepaalde materiaallagen in de geëvalueerde simulaties niets vermeld wordt, dan is dit omdat de vochtgehaltes erg ver onder het kritische vochtgehalte waarbij er schade optreedt, liggen.

6.3.6 Simulaties

Algemene opbouw - houtdoorsnede

Eerst wordt een simulatie gedaan voor de wandopbouw ter hoogte van de houtdoorsnede. De simulatie wordt gebaseerd op het klimaatbestand van het Gentse weerstation. Het totale vochtgehalte van de constructie neemt licht toe. Het vochtgehalte in de materiaallaag constructiehout stijgt wel relatief veel. Dit is te verklaren vanuit de grote neerslaghoeveelheid in het Gentse klimaatbestand. Daarom is het beter te opteren voor het klimaatbestand van de stad Kassel.

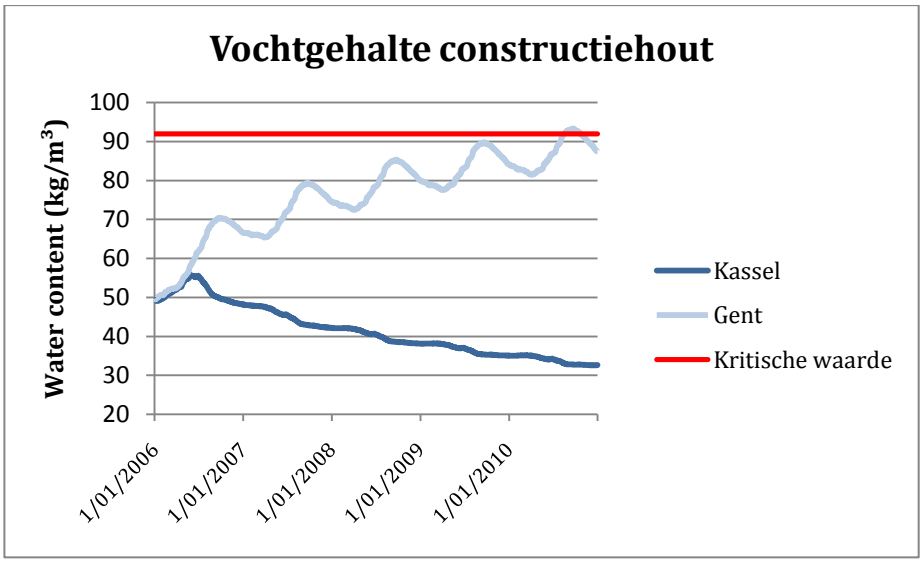


Fig 50 Vochtgehalte in het constructiehout in functie van de tijd, per klimaatbestand

Daarnaast is het meest opmerkelijke verschil tussen de twee klimaatbestanden, de oriëntatie van de regenbrengende winden. In België komt de grootste vochtbelasting uit het ZW, terwijl ze in Kassel uit het Z komt, waar echter een grotere zonnestraling is. Uit het totale vochtgehalte van de bouwschil, kunnen we afleiden dat in het geval van Z-oriëntatie de vochtbelasting iets grotere pieken kent. Het is dus veiliger om te rekenen met de Z-oriëntatie. Uit de grafiek is af te leiden dat - op basis van het klimaatbestand van Kassel - het constructiehout uitdroogt. Voor het gebruikte hout (ρ=460 kg/m^3), moet het vochtgehalte onder 92 kg/m^3 blijven. Aan deze eis is voldaan. Ook op onderstaande grafiek is te zien dat de constructie uitdroogt.

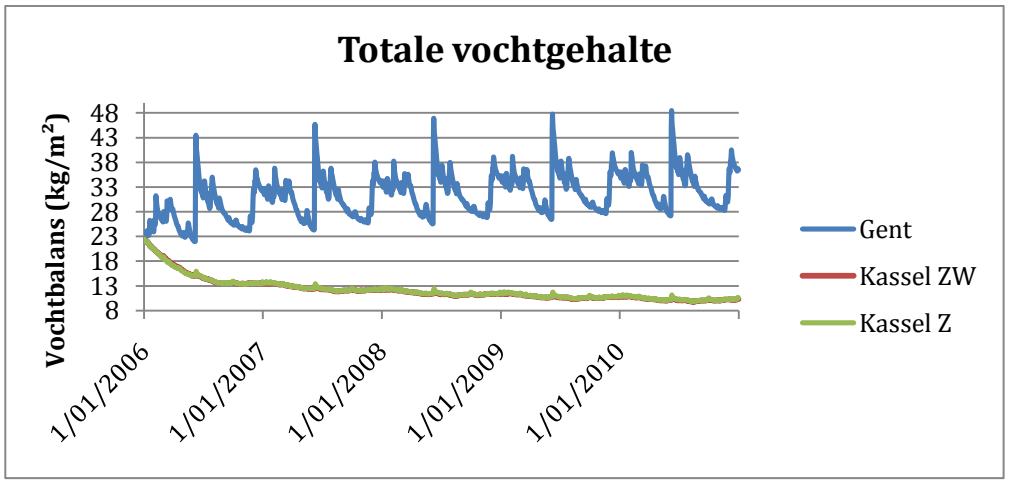


Fig 51 Totale vochtgehalte in de constructie in functie van de tijd, per klimaatbestand

Op de grafiek van de isopleten worden voor elke tijdsstap, per gekozen 'monitoring position' (plaats in de wandopbouw die je wil controleren), de plaatselijke hygrothermische parameters (temperatuur en relatieve vochtigheid) weergegeven. De LIM-curves die daarnaast te zien zijn voor het binnenoppervlak, LIM B I en LIM B II, bakenen een gebied af waaronder geen schimmelontwikkeling wordt verwacht. De

limietcurves zijn afhankelijk van de ondergrond. LIM B I is van toepassing op bio-afbreekbare substraten, zoals behangpapier, gipskartonplaat, ... LIM B II is van toepassing op substraten met een poreuze structuur, zoals pleisterwerk, minerale bouwmaterialen, hout, isolatiematerialen die niet tot de eerste substraatgroep behoren,...

Voor punten die wel boven de LIM-curves liggen, is schimmelontwikkeling mogelijk. Er is echter nog verder onderzoek nodig (met WUFI-Bio) om na te gaan hoe waarschijnlijk het voorkomen van schimmelvorming is.

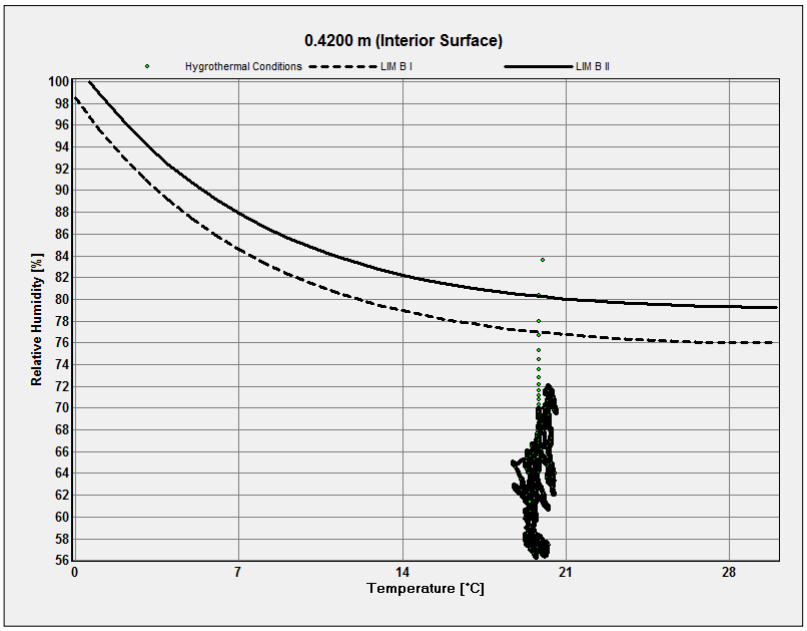


Fig 52 Isopleten: risico op schimmelontwikkeling op het binnenoppervlak t.p.v. de houtdoorsnede (WUFI)

Voor bovenstaande figuur wordt dus geen schimmelvorming verwacht. Desondanks is het interessant om het binnenklimaat dat gegenereerd wordt in WUFI, in te geven in WUFI-Bio. (zie § 6.4)

Algemene opbouw – isolatiedoorsnede

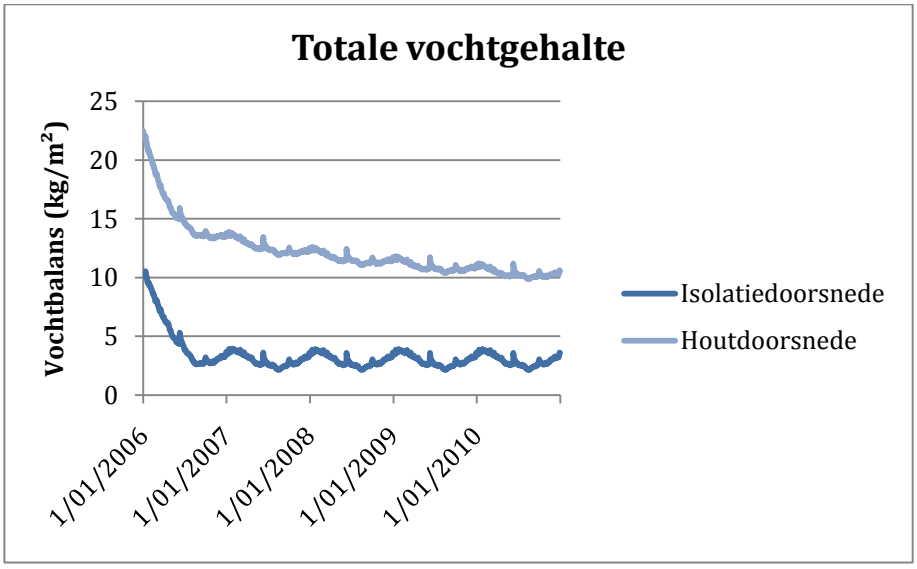


Fig 53 Totale vochtgehalte in de constructie ter hoogte van de isolatiedoorsnede en houtdoorsnede, i.f.v. de tijd

Ter hoogte van de doorsnede doorheen de isolatie, is de wand veel meer dampopen door de minerale wol. Hierdoor droogt de constructie veel sneller uit. De minerale wol bevat bij aanvang van de simulatie geen initieel vocht. Het vochtgehalte blijft ruim onder 10 kg/m^3, dus vormt geen probleem.

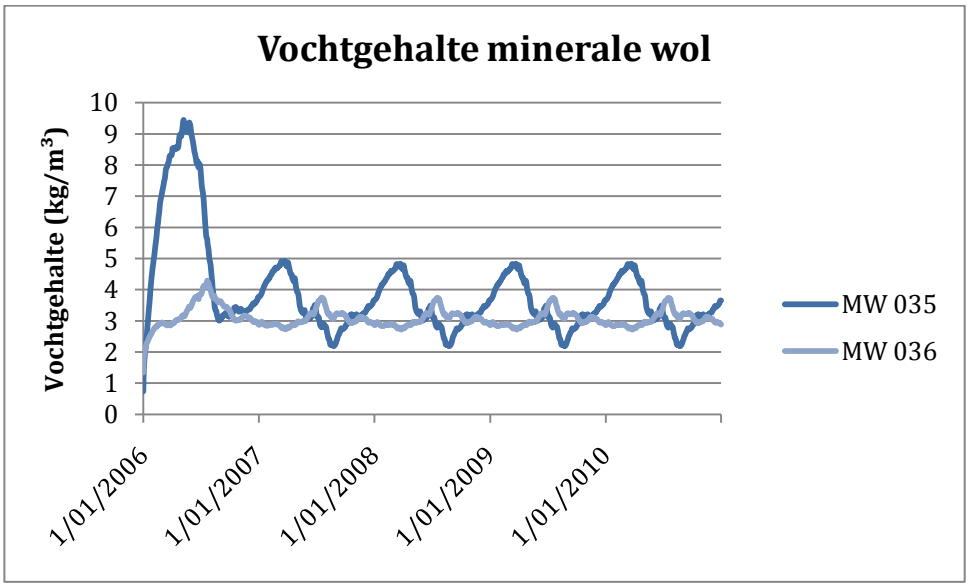


Fig 54 Vochtgehalte in de minerale wol tussen de constructie (MW035) en in de leidingspouw (MW 036), i.f.v. de tijd

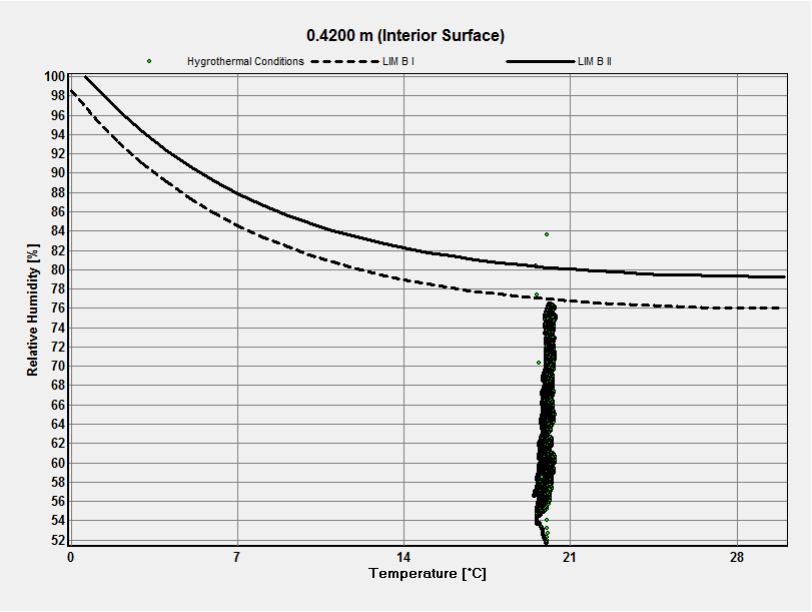


Fig 55 Isopleten: risico op schimmelontwikkeling op het binnenoppervlak, t.p.v. de isolatiedoorsnede (WUFI)

Op de grafiek met de isopleten op fig. 55, is te zien dat de temperaturen veel minder gespreid zijn dan bij fig. 52. Dit is logisch, aangezien de temperatuur door de sterke isolatie constant rond die van het binnenklimaat (20°C) blijft. De RV fluctueert wel meer dan t.h.v. de houtdoorsnede. Dit komt door het grote verschil in dampdiffusieweerstand (1,3 voor isolatie ten opzichte van 4427,4 voor hout). De diffusiesnelheid in het materiaal is veel groter, waardoor de RV veel sneller aangepast wordt.

Doorsnede ter hoogte van de funderingsaansluiting

Vervolgens wordt de simulatie gedaan voor de bouwknoop die de laagste binnenoppervlaktetemperatuur voortbrengt. In Bisco kunnen we aflezen dat de laagste binnenoppervlaktetemperatuur 16.7 °C is, ter plaatse van de funderingsaansluiting met de HSB-wand. Indien er in een ruimte schimmelontwikkeling kan plaatsvinden, zal het op die plek gebeuren, omdat -de andere drie typedetails ook in rekening gebracht - daar de temperatuur het laagst zal zijn. Het is dus interessant te weten hoe groot het risico op schimmelontwikkeling is, aangezien dat ook een indicatie geeft voor de rest van de ruimte.

Omdat het gebruikte WUFI-format slechts ééndimensionaal is, en de bouwknoop driedimensionaal, kan het risico benaderend ingeschat worden door de λ-waardes van het constructiehout en het leidinghout zo aan te passen, zodat de temperatuur aan het oppervlak gelijk wordt aan de laagste temperatuur t.h.v. de slecht ontworpen bouwknoop. Ten einde de temperatuur op 16.7 °C te brengen, dienen de λ-waardes van het constructiehout en het leidingspouwhout, respectievelijk 3 en 2 W/mK te zijn. Uiteraard is deze vereenvoudiging niet helemaal correct, aangezien de parameters van de werkelijk gebruikte materialen in de bouwknoop ook een rol spelen in het vocht- en warmtetransport.

De onderstaande grafiek toont de uitdrogingscapaciteit van de wand. Er is een evenwicht gevonden tussen de inkomende en uitgaande waterdampstroom, aangezien er geen vochtaccumulatie is in de tijd. Het vochtgehalte blijft na verloop van tijd ongeveer constant en vertoont enkel fluctuaties o.i.v. de seizoensveranderingen.

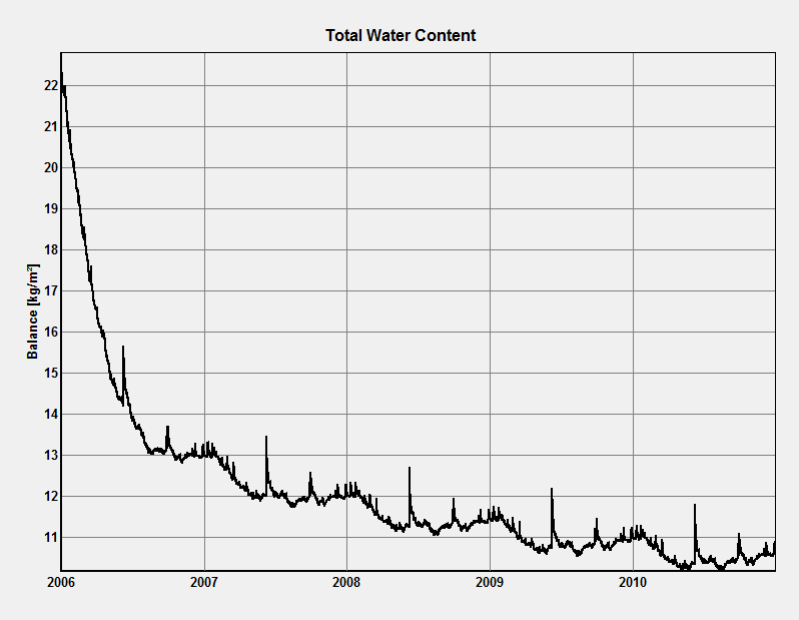


Fig 56 Totale vochtgehalte in de constructie ter hoogte van de bouwknoop, in functie van de tijd (WUFI)

Dat het totale vochtgehalte in dynamisch evenwicht is, wil nog niet meteen zeggen dat elke materiaallaag in de constructie dat ook is. Onderling kunnen ze nog steeds vocht uitwisselen. Het vochtgehalte van de houten constructielaag bevindt zich steeds onder 20% massavochtgehalte (of 92 kg/m^3). Er is dus geen gevaar op schimmelvorming. Dat is ook af te leiden uit de isopleten.

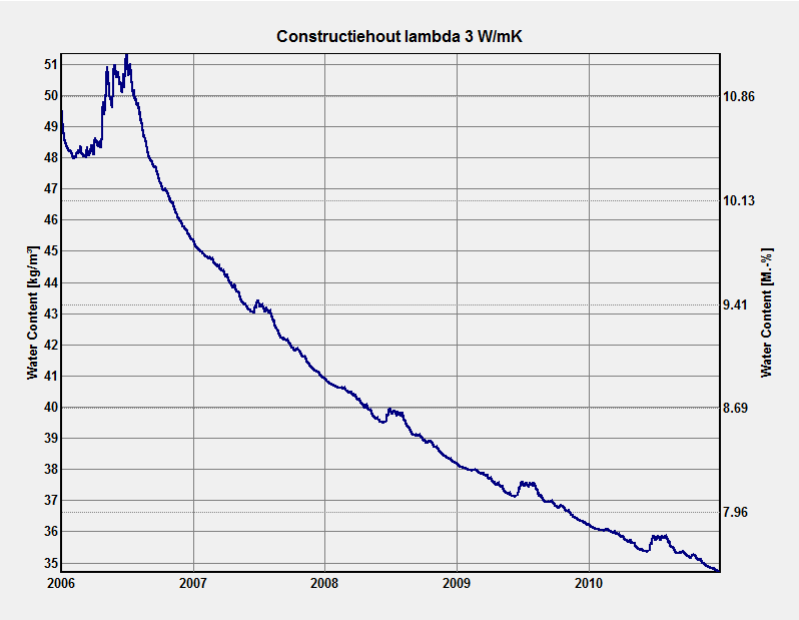


Fig 57 Vochtgehalte in de materiaallaag met aangepaste λ-waarde, t.p.v. de bouwknoop, in functie van de tijd (WUFI)

Uit de grafiek van de isopleten is af te lezen dat, door de grotere warmtegeleidingscoëfficiënt, de temperaturen aan het binnenoppervlak veel meer gespreid zijn. Dit komt doordat het buitenklimaat een grotere invloed heeft dan wanneer de wand goed geïsoleerd is.

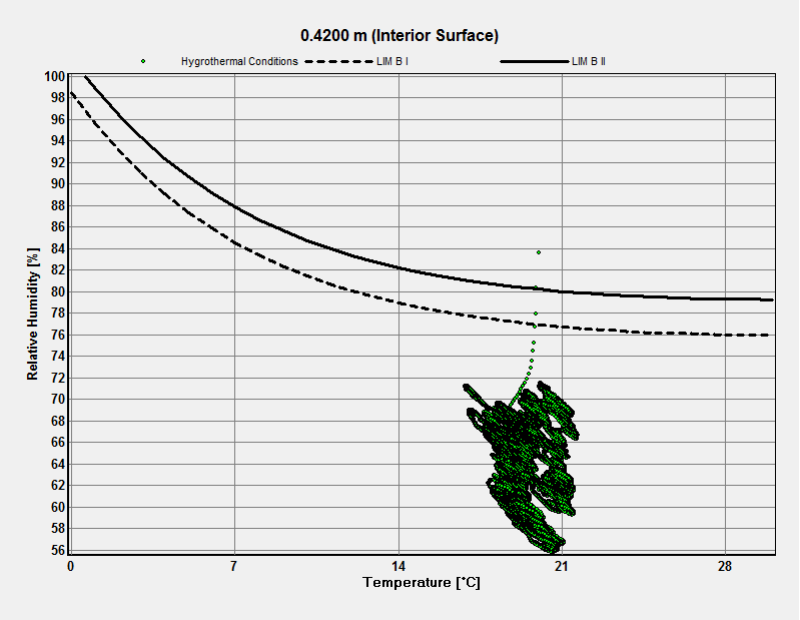


Fig 58 Isopleten: risico op schimmelontwikkeling op het binnenoppervlak, t.p.v. de bouwknoop (WUFI)

Invloed parameters buitenste materiaallaag

Vervolgens worden met de eigenschappen van het buitenoppervlak van de wand geëxperimenteerd, om de invloed ervan op de kans op schimmelvorming op het binnenoppervlak te onderzoeken.

De buitenste materiaallaag die rechtstreeks invloed heeft op de vocht- en warmteprocessen doorheen de gebouwschil, is in dit geval de houtwolplaat. De simulaties gebeuren op de houtdoorsnede bij een algemene wandopbouw (dus niet ter hoogte van een bouwknoop). De parameters worden één voor één aangepast, om het effect op schimmelontwikkeling te onderzoeken.

- *Dampdichtheid*

De dampdichtheid wordt verhoogd van 5 naar 50, gelijk aan de dampdichtheid van de durélisplaat. De constructie droogt iets minder snel uit, dit is vooral te zien aan het vochtgehalte in het constructiehout. Daarna wordt het dampdiffusieweerstandsgetal verhoogd tot 100. De constructie droogt opnieuw iets minder snel uit, maar er is geen opmerkelijk verschil als bij een dampdiffusieweerstandsgetal van 50. Hetzelfde geldt voor het vochtgehalte in het constructiehout. Op de schimmelontwikkeling heeft een grotere dampweerstand uiteindelijk nagenoeg geen invloed.

- *Hogere dichtheid*

De dichtheid wordt verhoogd van 168 naar 500 kg/m^3. Daardoor droogt de constructie ietwat trager uit, maar het is geen merkwaardig verschil. Door de hogere thermische massa is er wel een grotere thermische traagheid.

- *Lagere porositeit*

De porositeit wordt verlaagd van 0.883 naar 0.6 m^3/m^3. Doordat het materiaal minder holtes bevat, kan het minder water opslaan. Opnieuw heeft dit niet zoveel invloed. De constructie droogt enkel wat trager uit.

- *Lagere soortelijke warmte*

Hoewel de soortelijke warmte verlaagd wordt van 2100 naar 800 J/kgK, is de invloed op het totale vochtgehalte en het vochtgehalte in het constructiehout vrijwel verwaarloosbaar. De bouwschil droogt een weinig trager uit.

- *Hogere λ-waarde*

De λ-waarde van het materiaal neemt toe van 0.049 naar 1 W/mK. Hierdoor isoleert de houtwolplaat heel wat minder. Maar aangezien het een relatief dunne bouwlaag betreft, maakt ze niet zoveel verschil. Doordat de bouwlaag zich echter aan de buitenzijde van de schil bevindt, is de constructie minder warm en is er sneller kans op condensatie. De bouwschil droogt minder snel uit.

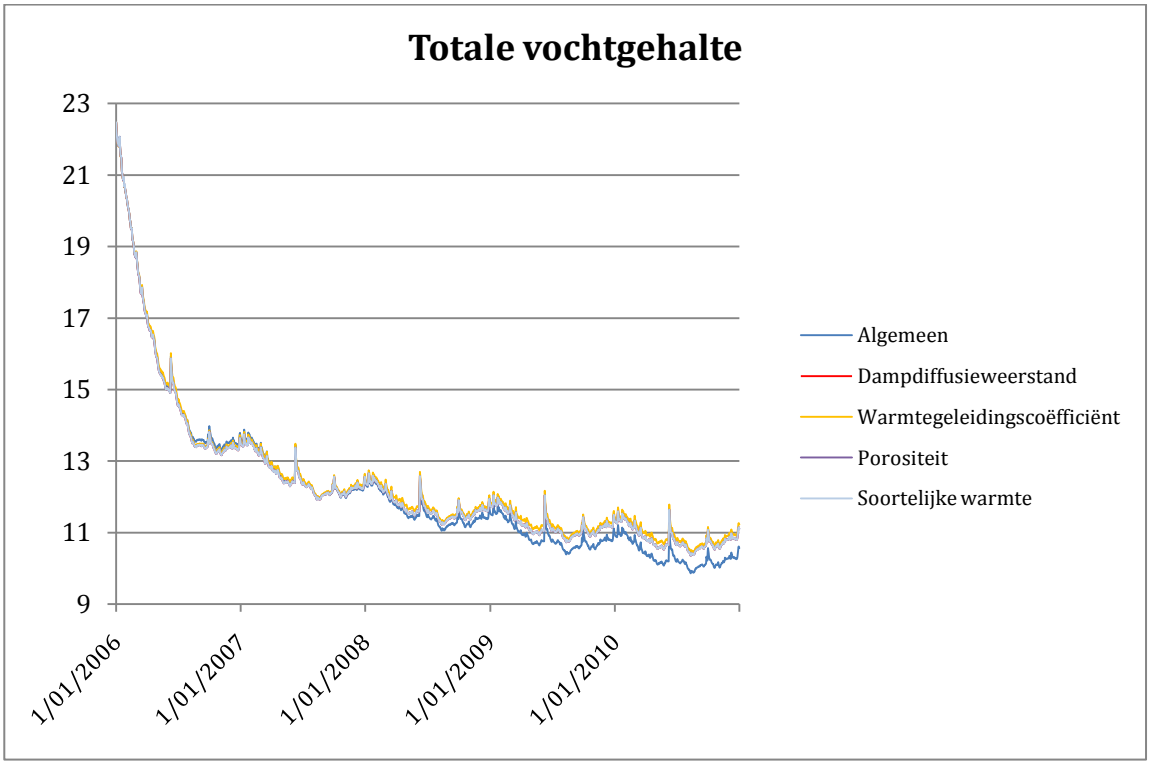


Fig 59 Totale vochtgehalte in de constructie, bij verschillende parameters. (WUFI)

Invloed materiaal binnenoppervlak

De invloed van het materiaal op het binnenoppervlak is het best te onderzoeken met behulp van WUFI-Bio. (zie verder)

Invloed vochtbron:lek

Ten eerste is het interessant om te onderzoeken wat de gevolgen voor het vochtgehalte en het risico op schimmelvorming zijn, indien er een lek ontstaat in een leiding in de leidingspouw. In WUFI kan men een vochtbron toevoegen in een bepaalde laag, in dit geval dus de leidingspouw. Door de extra vochtbelasting neemt de RV in bijna de volledige wand sterk toe. Het vocht accumuleert, zoals te zien is op onderstaande figuur.

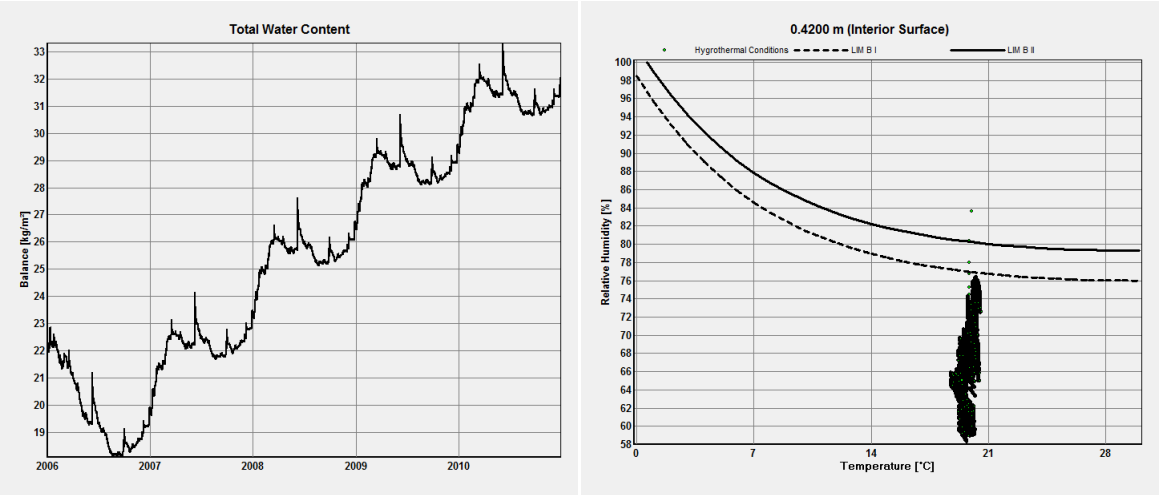


Fig 60 Links: Het totale vochtgehalte in de constructie neemt sterk toe; Rechts: Het risico op schimmelontwikkeling aan het oppervlak wordt groter. (WUFI)

Alhoewel de biohygrothermische omstandigheden onder de LIM-curves blijven, kan men niet met zekerheid zeggen dat er geen schimmelontwikkeling zal zijn. Dit is omdat, indien het lek niet wordt ontdekt en vervolgens gerepareerd, het vochtgehalte in de constructie steeds verder zal blijven stijgen.

6.4 WUFI-Bio

De binnenklimaatgegevens vanuit WUFI en de materiaalgegevens worden ingeladen in WUFI-Bio. WUFI-Bio is net als WUFI gebaseerd op de biohygrothermische methode van Sedlbauer.

De gemeten veranderende omgevingstoestand van de spore, wordt per uur opgenomen en dan vergeleken met de omstandigheden vereist voor ontkieming van de spore[21]. De laagste isopleet voor de ontkiemingstijd (dus diegene waarvoor de omstandigheden het langst moeten blijven voor er ontkieming is), verdeelt de grafiek in een zone waarin de binnenklimaatomstandigheden ontkieming toelaten, en een zone waarin geen ontkieming mogelijk is omdat de omstandigheden zich er niet genoeg toe lenen. Indien de laagste isopleten voor elke schimmelsoort die in het binnenklimaat kan voorkomen, verzameld worden op één grafiek, kan men de allerlaagste isopleet determineren (dit is de Lowest Isopleth for Mould growth. Onder deze LIM kan geen enkel binnenshuis voorkomende schimmelsoort zich ontwikkelen.) Om een veilige voorspelling te doen, veronderstelt WUFI-Bio dat, van zodra de omstandigheden gelegen zijn boven de LIM-curve, zich vrijwel meteen wel minstens één schimmelsoort zal ontwikkelen.

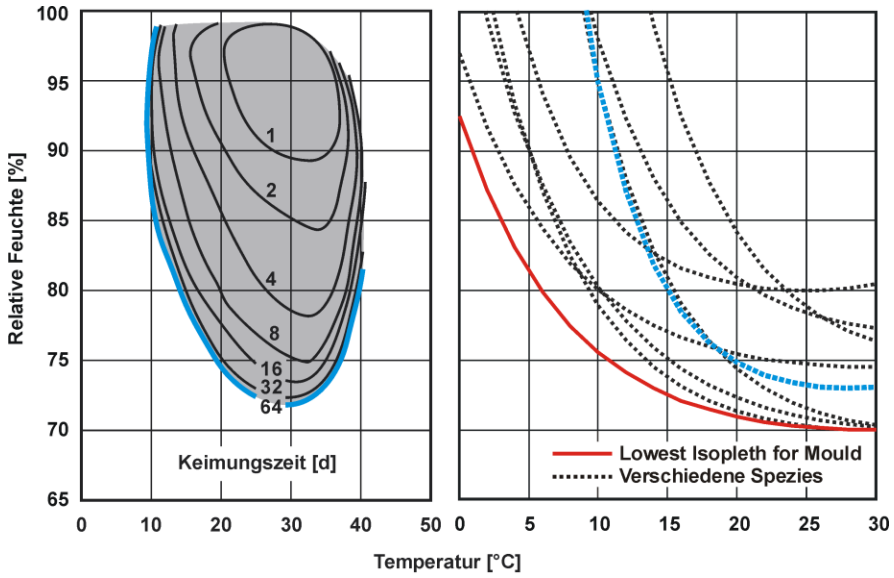


Fig 61 De LIM voor de isopleten voor de ontkiemingstijd kan afgeleid worden voor verschillende schimmelsoorten die in het binnenklimaat kunnen voorkomen. [86]

De schimmelontwikkeling vindt enkel plaats wanneer het vochtgehalte in de spore het kritisch vochtgehalte heeft bereikt. Dit vochtgehalte werd d.m.v. experimenteel

[21] De diameter van een spore is in werkelijkheid circa 3 µm, maar aangezien dit t.o.v. de afmetingen van de ingebrachte constructie-opbouw verwaarloosbaar klein is, stelt men de diameter op 1 cm. De hygrothermische parameters worden dan overeenkomstig aangepast.

onderzoek op ontkiemingstijd en groeisnelheid opgesteld[22]. Aangezien de relatieve vochtigheid en aldus ook het vochtgehalte van de spore afhankelijk is van de temperatuur, dient in elke tijdsstap van 1h, de temperatuur opnieuw in rekening gebracht te worden om het kritisch vochtgehalte te bepalen. De curves van de isopleten voor groeisnelheid zijn dus bepaald op basis van steady state-omstandigheden, terwijl in werkelijkheid de toestand meer dynamisch is.

Is er sprake van ontkieming, dan kan men m.b.v. groeicurves de verdere ontwikkeling van de aantasting voorspellen. De methode is gebaseerd op veilige veronderstellingen; de verkregen risicowaarde wordt hoger ingeschat dan ze in werkelijkheid is. [56] Eens de spore ontkiemd is, begint de schimmel te groeien, met een snelheid afhankelijk van de omgevingstemperatuur en RV, bepaald door de isopleet groeicurves, en de groei wordt geaccumuleerd over de tijd. Tijdens intermitterende droogperiodes, veronderstelt WUFI-Bio dat de schimmel niet meteen afsterft, maar dat de groei wel gestaakt wordt. Eens het kritische vochtgehalte weer bereikt wordt, hervat de schimmelontwikkeling. Dit is het geval voor de meeste schimmelsoorten.

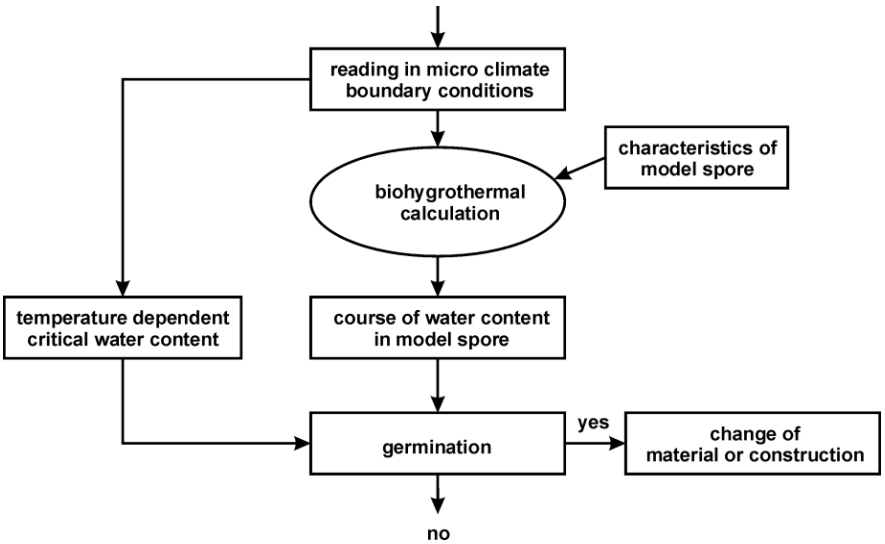


Fig 6243 Diagram van de procedure om schimmelontwikkeling te voorspellen d.m.v. biohygrothermische berekeningen. [56]

Strikt genomen geven de groeisnelheid-isopleten de groeisnelheid weer van de eerste hyfen van het mycelium, dus net na ontkieming. In WUFI-Bio stelt men de groeisnelheid van die hyfen echter gelijk aan die van het mycelium. Het kritieke vochtgehalte voor ontkieming ligt hoger dan dat voor verdere groei van de schimmel. Algemeen kan men stellen dat - eens voorbij ontkieming - de groei minder veeleisend is wat betreft klimaatomstandigheden. Voor de eenvoud stelt WUFI-Bio beide kritieke vochtgehaltes echter gelijk.

[22] De schimmelsporen werden blootgesteld aan verschillende combinaties van RV en temperatuur. De tijdsduur tot ontkieming en de groeisnelheden werden opgemeten en vastgelegd in een temperatuur-RV-grafiek. Dit zijn de isopleten.

De groeisnelheid geeft aan over welke afstand de aangetaste plek zich uitbreidt in de tijd. De totale groei is dan gelijk aan de straal van de schimmelvlek.

Het programma werkt met een aantal veiligheidsfactoren, zodat, indien het onderzoek aangeeft dat er geen schimmelvorming mag verwacht worden, er ook effectief geen zal zijn. Factoren die een belemmerende uitwerking zouden hebben op schimmelgroei als licht, zoutgehalte, pH-waarde, zuurstofgehalte, oppervlaktekwaliteit en biogene factoren, worden achterwege gelaten in het model, waardoor de verkregen resultaten voor ontkiemingstijd en groeisnelheid hoger zullen uitvallen dan ze zouden zijn onder werkelijke omstandigheden. Het resultaat dat men bekomt met WUFI-Bio geeft vooral een semi-kwantitatief criterium voor de vergelijking tussen verschillende constructie-opbouwwijzen. [56]

6.4.1 Invoergegevens

6.4.1.1 Het klimaat

De binnenklimaatgegevens werden door WUFI gegenereerd op basis van het buitenklimaatbestand. De relatieve vochtigheid en de temperatuur binnen bepalen samen met het substraatmateriaal wat de kans op schimmelvorming is. Het initiële vochtgehalte in de spore is standaard ingesteld op 0,5 in WUFI-Bio.

6.4.1.2 Substraat

In WUFI-Bio kan men ingeven welke substraattype het materiaal van het binnenoppervlak is.
Om de isopleten op te stellen, werd het experimenteel onderzoek gevoerd op voedzamere kweekbodems dan de substraten die in de praktijk voorkomen in gebouwen. Omdat de substraten wel degelijk een invloed hebben op het kritisch vochtgehalte en de groeisnelheid van de spore, werden ze onderverdeeld in drie verschillende categorieën, substraatklassen 0, I en II.

- Substraatklasse 0: optimale voedingsbodem. Maximale groei mogelijk voor gelijk welke schimmel die voorkomt in gebouwen.
- Substraatklasse I: bio-bruikbare substraten, zoals behangpapier, gipskarton-platen en andere bouwproducten vervaardigd uit biologisch afbreekbare materialen, materialen voor permanent elastische verbindingen, en sterk vervuilde oppervlakken.
- Substraatklasse II: substraten die minder bio-bruikbaar zijn met poreuze structuur, zoals pleister, bepaalde houtsoorten en isolatiemateriaal dat niet behoort tot substraatklasse I.

Inerte materialen zoals glas, metaal, .. worden normaal gezien niet aangetast, tenzij ze verontreinigd zijn.
Naast klasse 0, I en II, is er ook nog een vierde klasse, klasse K (kritische Pilze, kritieke schimmels), die van toepassing is voor schimmels die mogelijk schadelijk zijn voor de gezondheid van de mens. (Deze schimmelsoorten zijn *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus flavus*, *Stachybotrys chartarum* en andere.) De kritieke schimmelsoorten stellen t.o.v. de andere schimmelsoorten strengere voorwaarden aan de klimaatomstandigheden, en komen dus enkel voor onder echt gunstige klimaatomstandigheden voor schimmels.
Indien onzekerheid bestaat over welke substraatklasse een bepaald materiaal toebehoort, dient de meest kritieke klasse gekozen te worden, om preventief te handelen. [86]

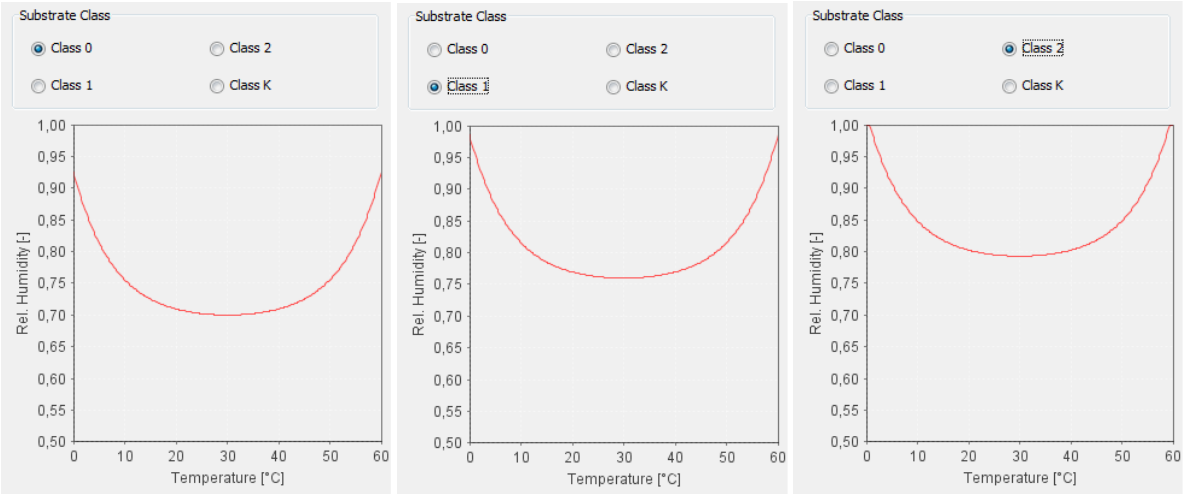


Fig 6344 Naargelang het substraattype meer geschikt is voor schimmels, met klasse 0 het meest geschikt, worden de voorwaarden voor RV en temperatuur minder streng om schimmelontwikkeling te krijgen. (WUFI-Bio)

6.4.2 Resultaten

6.4.2.1 Evaluatie van de resultaten

De resultaten worden in WUFI geëvalueerd met behulp van een kleurencode.

Een groen verkeerslicht betekent dat de schimmelontwikkeling kleiner is dan 50mm/jaar. Dit komt overeen met een schimmelindex van ongeveer 0.5. Over het algemeen is deze situatie aanvaardbaar.

Een geel verkeerslicht wil zeggen dat de schimmelontwikkeling tussen 50mm/jaar en 200mm/jaar zit. Er is bijkomend onderzoek nodig, of extra criteria om te evalueren of de situatie aanvaardbaar is.

Een rood verkeerslicht tenslotte betekent dat de schimmelontwikkeling groter is dan 200mm/jaar, wat overeenkomt met een schimmelindex van ongeveer 2. Deze situatie is over het algemeen niet aanvaardbaar.

6.4.3 Simulaties

Algemene wandopbouw - houtdoorsnede

Op bijhorende figuur is te zien dat voor substraatklasse 0 (dus de meest gunstige voedingsbodem voor schimmels), het vochtgehalte in de spore het grootste deel van de tijd onder het kritische vochtgehalte blijft, waardoor men kan stellen dat er normaal geen schimmelontwikkeling zal plaatsvinden. Dit wordt bevestigd door de schimmelindex, die ruim onder 1 blijft, waardoor de schimmelontwikkeling verwaarloosbaar is. Aangezien op een binnenoppervlak van substraattype 0 al geen schimmelontwikkeling plaatsvindt, kan men afleiden dat er ook voor minder gunstige ondergronden zich geen schimmelontwikkeling zal voordoen.

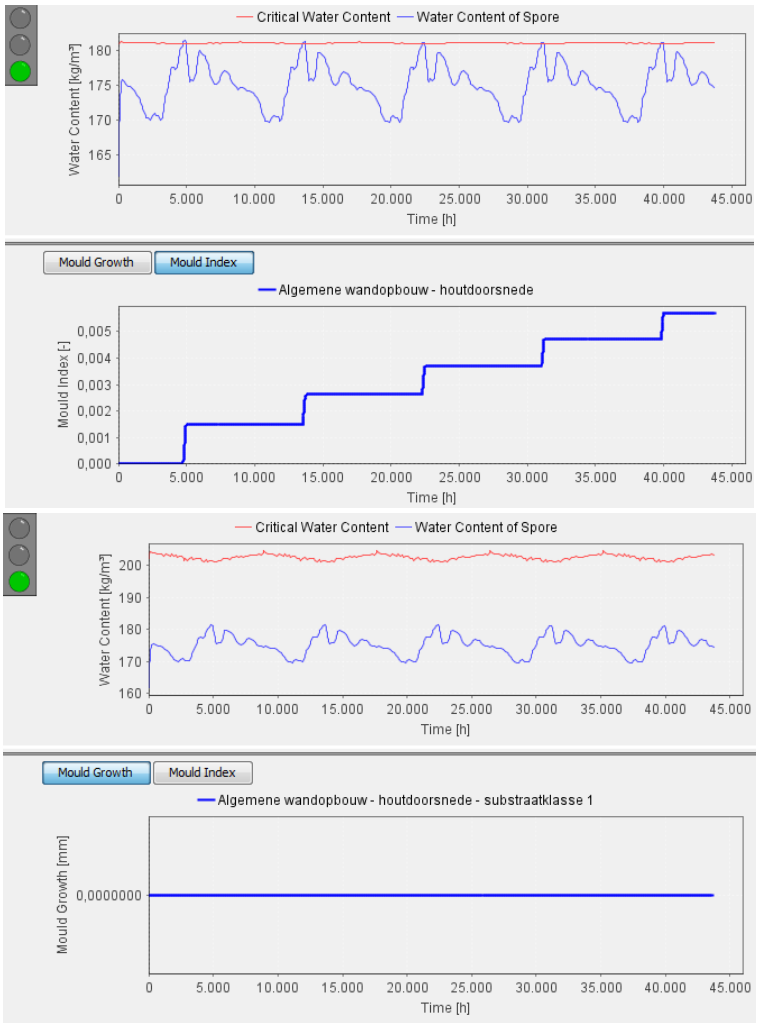


Fig 6445 Voor substraatklasse 0 (boven) bevindt het vochtgehalte van de spore zich vrijwel constant onder het kritische vochtgehalte. De schimmelontwikkeling is kleiner dan 50mm/jaar. De bijhorende schimmelindex blijft dicht bij 0, wat aangeeft dat de groei van de schimmel verwaarloosbaar is. Voor substraatklasse 1 (onder) bevindt het vochtgehalte zich dan ook ver onder het kritische vochtgehalte. (WUFI-Bio)

Algemene wandopbouw - isolatiedoorsnede

Zoals eerder uit de resultaten van WUFI bleek, liggen de biohygrothermische omstandigheden ter hoogte van de isolatiedoorsnede iets dichter bij de LIM-curves. WUFI-Bio geeft echter aan dat het risico op schimmelontwikkeling ongeveer hetzelfde is als ter hoogte van de houtdoorsnede. De mould index is een klein beetje groter.

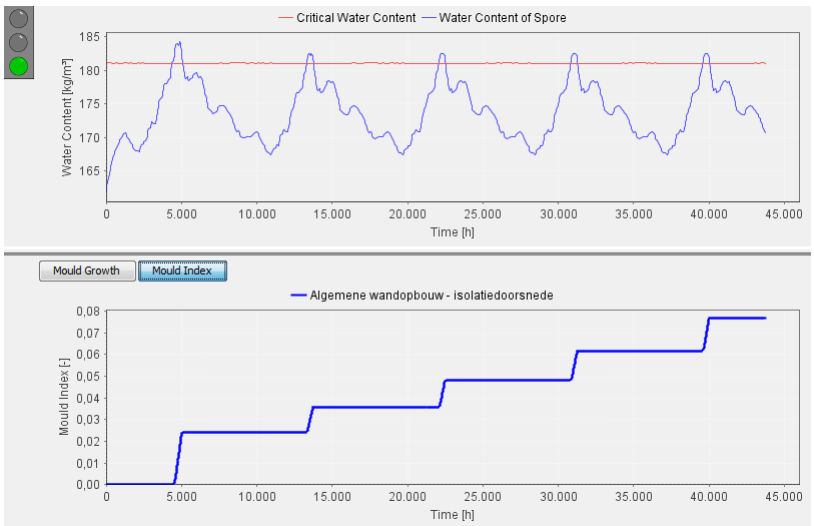


Fig 6546 Voor substraatklasse 0 bevindt het vochtgehalte van de spore zich nog steeds vrijwel constant onder het kritische vochtgehalte. De schimmelontwikkeling is kleiner dan 50mm/jaar. De bijhorende schimmelindex blijft dicht bij 0, wat aangeeft dat de groei van de schimmel verwaarloosbaar is. (WUFI-Bio)

Doorsnede ter hoogte van de funderingsaansluiting

Alhoewel men zou verwachten dat er meer kans op schimmelvorming is ter plaatse van een slecht ontworpen bouwknoop, geeft WUFI hier aan dat het risico op schimmelvorming nihil is. De schimmelindex is gelijk aan 0. Dit komt omdat de oppervlaktetemperatuur binnen nog altijd veel hoger is dan het dauwpunt, waardoor geen condensatie ontstaat aan het oppervlak. De temperaturen zijn echter wel lager dan wanneer de wand goed geïsoleerd is, wat minder geschikt is voor de schimmel.

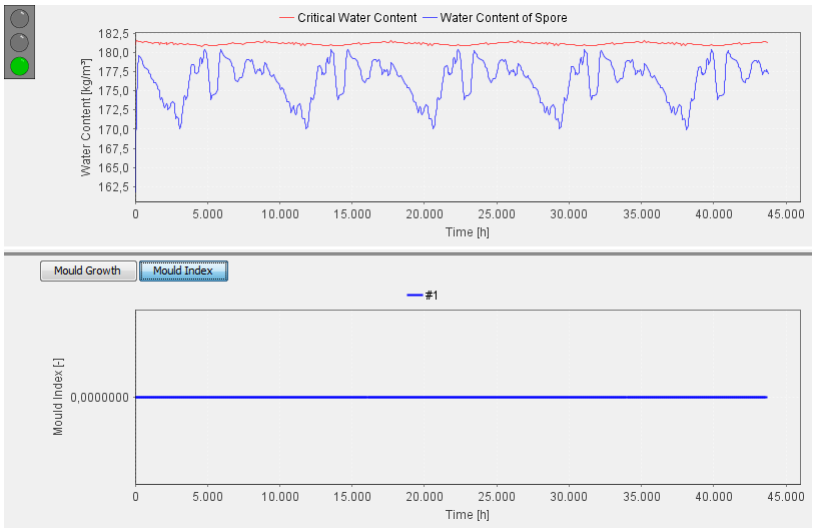


Fig 6647 Voor substraatklasse 0 bevindt het vochtgehalte van de spore zich steeds onder het kritische vochtgehalte. De schimmelontwikkeling is kleiner dan 50mm/jaar. De bijhorende schimmelindex is gelijjk aan 0, wat aangeeft dat er geen schimmelontwikkeling zal zijn. (WUFI-Bio)

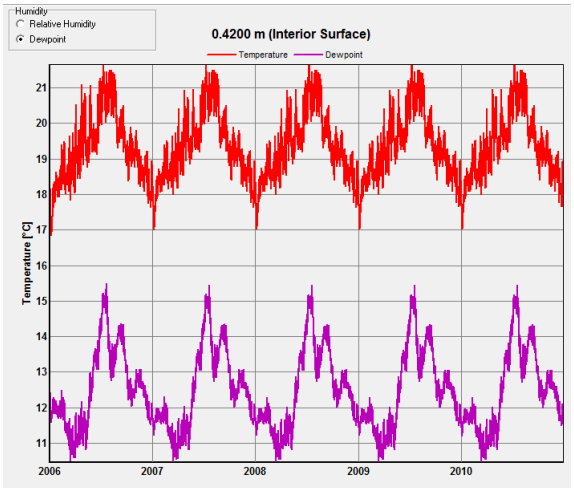


Fig 6748 De temperatuur aan het binnenoppervlak is hoger dan het dauwpunt, waardoor geen condensatie kan ontstaan. (WUFI)

Indien echter de vochtbelasting binnen toeneemt, met een verandering van BKK 3 naar BKK4, ontstaat er wel een reëel risico op schimmelvorming.

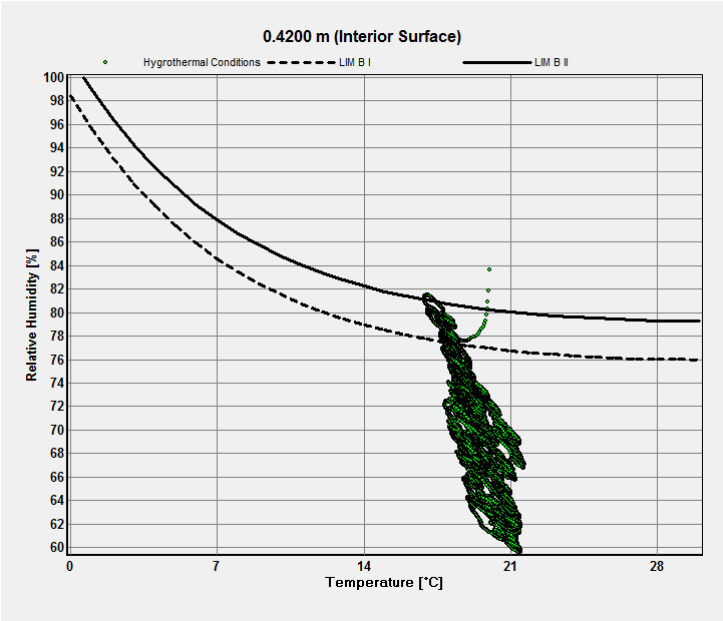


Fig 6849 Isopleten: risico op schimmelontwikkeling op het binnenoppervlak, t.p.v. de bouwknoop, bij BKK 4 (WUFI)

In onderstaande figuur bevindt het vochtgehalte van de spore zich vrijwel de hele tijd boven het kritische vochtgehalte. Het gele verkeerslicht geeft aan dat de schimmelontwikkeling zich tussen 50 en 200 mm/jaar bevindt. In het geval van substraatklasse 1, bv. voor een binnenafwerking met behangpapier of gipskartonplaat, kleurt het verkeerslicht groen, en is het gevaar op schimmelontwikkeling geweken. De schimmelindex stijgt dan niet boven 0.008.

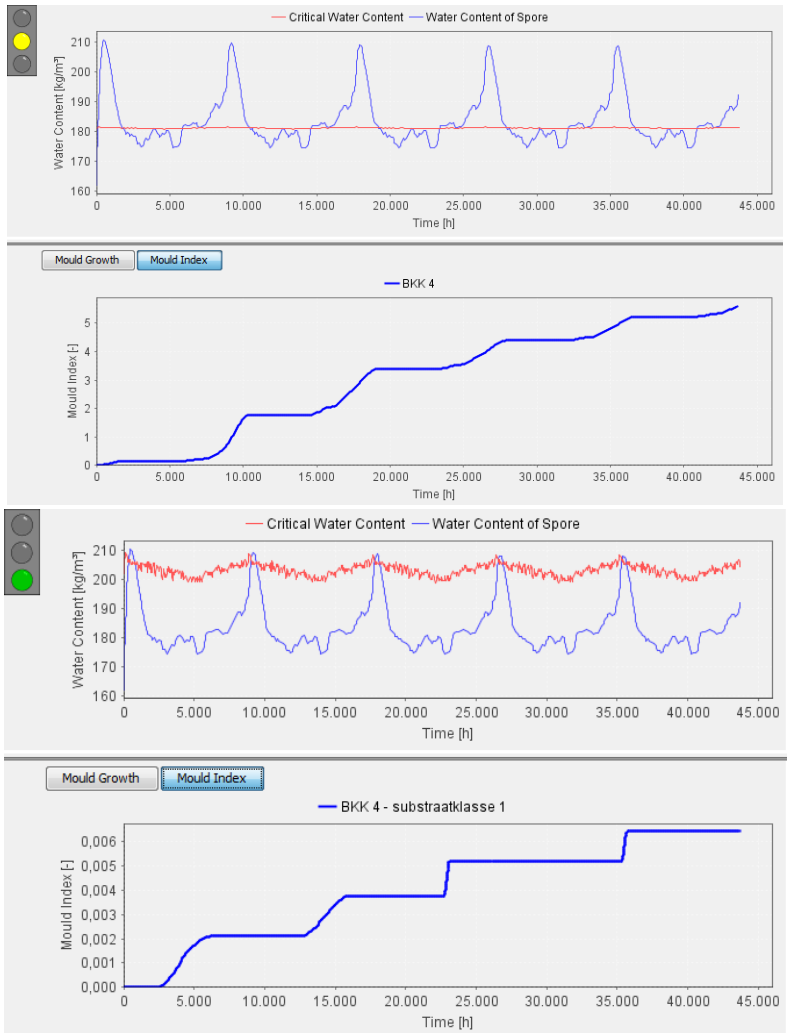


Fig 6950 Voor substraatklasse 0 en BKK 4 bevindt het vochtgehalte van de spore zich vrijwel de hele tijd boven het kritische vochtgehalte. De bijhorende schimmelindex stijgt tot 6, de hoogste index. Voor substraatklasse 1 (onder) is het risico op schimmelgroei al sterk verminderd. (WUFI-Bio)

6.5 De typedetails

De details die besproken worden, zijn typedetails van een laag-energiewoning van een Belgisch bouwbedrijf dat de grootste speler is op de houtskeletbouwmarkt voor woningen, Sibomat Woningbouw. Ze worden momenteel nog niet gebruikt in de praktijk, maar zullen in de toekomst waarschijnlijk wel aangewend worden. De vier typedetails zijn details die vaak voorkomend zijn in de woningbouw:

- Dorpelaansluiting raam;
- Funderingsaansluiting vloer op volle grond;
- Plat dak;
- Hellend dak.

De uitgetekende bouwdetails zijn terug te vinden in Bijlage 5.

6.5.1 Aanbevelingen

Voor de typedetails worden aanbevelingen op constructief, thermisch, hygrisch en praktisch niveau gedaan. Het zijn voorbeelden voor een goede uitvoering. De maatvoering en de materiaalkeuzes geven slechts een indicatie. Elk typedetail waarvoor aanbevelingen worden gemaakt op thermisch niveau, wordt opnieuw ingevoerd in Bisco, om de vergelijking te kunnen maken met het origineel typedetail.

Aanbevelingen worden cursief aangeduid.

6.5.2 Bespreking, algemene opbouw en algemene aanbevelingen

De Durélis/Populair plaat in de wandopbouw doet dienst als verstijvend element. Het is een hoge-densiteitsspaanplaat van 12 mm dik, die tegelijk werkt als luchtdichte en dampremmende laag (μ=±40). De plaat heeft een tand- en groefverbinding, die verlijmd en geschroefd wordt ter bevestiging van de plaat. De dampremmende laag wordt luchtdicht afgewerkt op de naden met kleefband, volgens de regels van de kunst (zie ook Hoofdstuk 4)

De leidingen bevinden zich in de leidingspouw tussen de Duragyp binnenafwerking en de dampremmende Durélisplaat.

Voor de isolatiematten van minerale wol, die tussen de houtstructuur geplaatst worden, is het belangrijk dat er geen holtes zijn.

De wandbeschieting aan de buitenzijde, die zacht en dampopen is, is in dit geval een houtwolplaat. Deze is waterafstotend en winddicht, en akoestisch en thermisch isolerend. De plaat van 18 mm dikte, vlakt met een warmtedoorgangscoëfficiënt λ van 0.049 voor een deel de 'koudebrug' van het constructieve houtkader uit. De buitenzijde

van de constructie is altijd meer dampopen dan de binnenzijde, dit is omdat eventuele damp in de constructie dan naar buiten toe kan uidrogen. De platen worden voorlopig bevestigd met nagels met platte kop of met schroeven.

Om de koudebrug nog meer te beperken, kunnen voor het aanbrengen van de houtwolplaat, eerst nog stroken houtwolplaat ter hoogte van de wandstijlen en -regels bevestigd worden, waarop dan de effectieve houtwolplaten komen. Maar zoals uit simulaties verder in dit werk zal blijken, is dit niet nodig, aangezien het hout van de houtstructuur op zich al redelijk isolerend is, en de temperaturen aan het oppervlak niet opmerkelijk lager zijn dan waar de isolatie zich bevindt.

De platen worden met de langste zijde horizontaal geplaatst, met de tand bovenaan en de groef onderaan. Dit wordt zo gedaan, omdat water niet in de groef zou blijven staan en moeilijk zou kunnen opdrogen (zie ook § 6.6). Ze worden ook in wildverband aangebracht, dit wil zeggen dat de verticale voegen zich niet telkens in het verlengde van elkaar bevinden, dit om de concentratie van kwetsbare plekken te vermijden.

Daarna worden de platen definitief bevestigd door ze vast te nieten met corrosiebestendige nieten. Deze methode wordt gebruikt bij een buitenspouwblad. Bij een houten gevelafwerking zou men de platen bevestigen met verluchtingslatten, waarop dan de houten planken of regels worden aangebracht. In het laatste geval heeft de buitenbekleding open voegen tussen de verschillende onderdelen, waardoor een wind- en waterdichtingsfolie nodig is.

Door de luchtdichtingslaag te voorzien achter de leidingspouw, wordt vermeden dat de luchtdichting al te vaak doorboord moet worden om leidingen en kabels door te voeren, contactdozen te plaatsen, ... Zo wordt de continuïteit van de luchtdichtheid verzekerd. De leidingspouwlatten kunnen horizontaal of verticaal aangebracht worden; in dit geval verticaal, ter hoogte van het houten constructiekader. De holle ruimte tussen de houten latten wordt nadat alle leidingen en kabels aangesloten zijn, opgevuld met minerale wol. Ook hier vlakt men de koudebrugwerking van het houten constructiekader wat mee uit.

Om de koudebrugwerking nog wat meer te beperken, zou men ook spouwisolatie kunnen aanbrengen, bovenop de houtwolplaat. Maar aangezien hier al een structuurdikte van 18 cm gebruikt wordt, is het denkbaar dat een extra spouwisolatie geen echte noodzaak is. Het hout isoleert immers ook al wat, zij het in mindere mate.

Het gebruikte hout is verduurzaamd volgens het Sarpeco 9 procédé. Deze verduurzamingsmethode levert een preventieve bescherming tegen blauwschimmels, houtaantastende zwammen en larven van houtaantastende insecten. Daarmee kan het hout in gebruiksklassen 1 tot en met 4 aangewend worden.

Voor het massief constructiehout kan ook niet chemisch verduurzaamd spintvrij kernhout met een duurzaamheidsklasse I, II of III gebruikt worden, zoals Oregon of Douglas, Europees grenen, of Larix, volgens NBN EN 13556 en NBN En 14081-1. De impact van verduurzaamd hout in een houtskeletbouw, ingepakt tussen andere materialen, is niet

danig groot als bij hout waarmee de mens in rechtstreeks contact staat, zoals houten gevelafwerking. Desondanks vormt verduurzaamd houtafval een belasting op het milieu. Tijdens de plaatsing en de aanmaak van de verduurzamingsproducten, worden zowel het milieu als de mens belast.

Naargelang de gebruiksklasse waarin het hout zal terechtkomen, is het belangrijk een afweging te maken tussen het risico op aantasting door insecten of schimmels, en de milieubelasting en energieverbruik die verduurzaming teweegbrengt.

Om het milieu zo min mogelijk te belasten op het vlak van transport en duurzaam bosbeheer, is het aangewezen een houtsoort te gebruiken die lokaal voorhanden is, en FSC-gelabeld.

De luchtspouw kan eventueel geïsoleerd worden. Spouwisolatie zou de koudebrugwerking van de houten constructiedelen in de wand kunnen beperken. De afstand tussen het gevelmetselwerk en de houtskeletwand moet voldoende groot zijn, opdat de differentiële thermische bewegingen van beide ten opzichte van elkaar zou kunnen opgenomen worden door de spouwankers.

Tenslotte dient nog even vermeld te worden dat dit niet dé goede oplossing is, en dat er uiteraard nog andere goede oplossingen mogelijk zijn.

TYPEDETAIL DORPELAANSLUITING RAAM

De HSB-wand wordt opgebouwd volgens de regels van de kunst.

De luchtdichte damprem van de wand dient ononderbroken aan te sluiten op de luchtdichting van de andere onderdelen van de buitenschil, in dit geval het raamprofiel.

Zijdelings langs de raamopening worden randbalken geplaatst om het geheel te versterken.

Rond het schrijnwerk wordt een stijf kader gemaakt uit multiplex. De multiplexplaten worden onderling luchtdicht met elkaar verbonden. Om het geheel van multiplexkader en schrijnwerk luchtdicht te krijgen, worden ze op een luchtdichte manier met elkaar verbonden.

Het multiplex raamkader heeft iets kleinere afmetingen dan de aanwezige opening in de wand. Die kleine speling laat een eenvoudigere plaatsing toe. De holte tussen het multiplexkader en de opening wordt later opgespoten met PUR-isolatie. Het kader zelf wordt vastgeschroefd op de houtstructuur.

Vooraleer de venstertablet en de afwerking rond het raam geplaatst worden, verbindt men het multiplexkader met de Durélisplaat door middel van een luchtdichte folie. De naden worden goed afgekleefd.

Om een luchtdichte aansluiting te verkrijgen voor dit bouwdetail, zou de luchtdichte folie beter rechtstreeks aansluiten op het schrijnwerk.

Aan de buitenzijde van de houtwolplaat zou een winddichtingsfolie moeten aangebracht worden die doorloopt tot net onder het raamprofiel, en die de naden tussen de houtwolplaat en de multiplex beschermt tegen capillair vochttransport.

Voor de dorpel wordt geplaatst, wordt een waterkerende folie geplaatst om opstijgend vocht tegen te gaan. De folie wordt tot net onder het raamprofiel gebracht.

De dorpel buiten steunt volledig op het buitenspouwblad. De dorpel mag niet bevestigd worden aan het houtskelet, omdat door de werking van het hout de dorpel zou kunnen breken.

Meestal wordt een dorpel gebruikt met een dorpelopstand aan de achterzijde ervan. Deze dorpelopstand zou net onder het afwateringsprofiel van het raamprofiel moeten komen. Door de opstand kan water moeilijker onder het afwateringsprofiel door worden geblazen.

De voegen aan de zijkanten van het raamprofiel worden afgewerkt met een elastisch blijvende voegkit.

Omdat het typedetail schrijnwerk momenteel net niet voldoet aan de eisen om een EPB-aanvaarde bouwknoop te zijn, zou men eventueel de mortel onder de venstertablet kunnen vervangen door isolerende Pirotherm mortel. Deze mortel heeft een λ-waarde van 0,12 W/mK, wat meteen een groot effect heeft op de ψ-waarde, die hiermee 0,089 W/mK wordt (ten opzichte van 0,334 W/mK).

TYPEDETAIL FUNDERINGSAANSLUITING VLOER OP VOLLE GROND

De funderingzool wordt gegoten. Hierop komt een funderingsopstand uit betonblokken. De gewapende betonplaat komt bovenop EPS-isolatie, en steunt op volle draagkrachtige grond. De EPS-isolatie is drukvast, en hydrofoob.

Eventueel kan ook cellenglas gebruikt worden, of XPS, ... XPS wordt in de praktijk het meest gebruikt.

Het vochtgehalte van het isolatiemateriaal is bepalend voor de prestatie ervan. Indien het isolatiemateriaal vochtig is, neemt de warmtegeleidbaarheid toe, en isoleert het dus minder goed dan wanneer het droog is. Dit vocht kan afkomstig zijn van het aanmaakwater van de betonlaag die erbovenop komt, of het kan capillair vanuit de onderliggende grondlagen in het isolatiemateriaal dringen.

Om te vermijden dat het natte betonmengsel te snel uitdroogt door insijpeling van aanmaakvocht in de grond, en om opstijgend grondwater te vermijden, wordt bovenop de EPS-isolatie een polyethyleenfolie gelegd.

Eventueel kan ook onder de drukvaste isolatie een folie worden gelegd.

Door de isolatie onder de betonplaat, krijg je een vlakkere ondergrond waarop kan verdergewerkt worden. De isolatie is weinig vervormbaar; ze bestaat uit harde platen. De ondergrond moet bijgevolg voldoende vlak zijn uitgevoerd, zodat de vlakheid van de isolatielaag gegarandeerd is, en er geen hoogteverschillen zijn tussen de platen ter hoogte van de voegen. Isolatiemateriaal dat soepel of meer vervormbaar is, hoeft geen zodanig vlakke ondergrond, en kan de imperfecties uitvlakken.

De houtskeletwand wordt aangezet op een muurplaat van een meer duurzame houtsoort, *Angelim Pedra*. De grondbalk is duurzamer omdat ze beter bestand moet zijn tegen vocht en aantasting. Ze vervult immers een cruciale rol in de structuur, en haar eigenschappen moeten behouden blijven opdat ze de belasting van de bovenliggende verdiepingen kan torsen. In de gewapende betonplaat worden vooraf verankeringselementen ingestort om de muurplaat te bevestigen. De muurplaat wordt waterpas gezet met stelblokjes, en op het juiste peil gebracht. De muurplaat wordt in krimpvrije mortel gedrukt.

De muurplaat zou beschermd moeten worden tegen indringend vocht met een bitumenlaag of EPDM-laag, die dan langs de buitenzijde van de gewapende betonplaat naar beneden wordt gebracht. De waterkerende laag kan vastgebrand of gelijmd worden.

Aan de houtwolplaat wordt met lijm en nieten een EPDM-folie bevestigd, die langs de zijkant van de betonplaat en de fundering, het water in de luchtspouw naar buiten leidt.

Om de koudebrugwerking ter hoogte van de muurplaat en de gewapende betonplaat op te heffen, zou men in de luchtspouw een strook waterbestendige isolatie kunnen plaatsen (vb. cellenglas, of glaswol). De isolatie wordt afgewerkt met een waterkerende laag, die het vocht naar buiten afleidt, en die wordt gelijmd en nadien bevestigd met nieten op de houtwolplaat. De spouwisolatie moet dampopen zijn.

De geprefabriceerde HSB-wanden worden met de onderregel op de stelregel bevestigd. De houtskeletwanden komen op de bouwplaats toe zoals ze op onderstaande foto te zien zijn[23].

Fig 7051 Geprefabriceerde HSB-wanden.

Een luchtdichte, dampremmende folie (vb. Pro Clima DA) verbindt de luchtdichte laag van de wand, de durélisplaat, met de gewapende betonplaat. De folie wordt met een elastisch blijvende lijm in een ononderbroken lijn op de betonlaag bevestigd en luchtdicht afgekleefd op de durélisplaat.

Vanaf de houtwolplaat vertrekt een water- en winddichte EPDM-folie, die het vocht in de luchtspouw naar buiten voert doorheen de stootvoegen.

Het metselwerk wordt volgens de regels van de kunst opgetrokken. Aan de onderzijde van de luchtspouw wordt een folie geplaatst die het spouwvocht naar buiten leidt via de open stootvoegen.

[23] Er dient wel opgemerkt te worden dat de wandopbouw niet volledig overeenkomt met de wandopbouw van de typedetails.

De snelbouwsteen die zich onderaan het gevelmetselwerk bevindt, en onder het niveau van het maaiveld, is gevoelig voor vorstschade. De snelbouwsteen dient bijgevolg beschermd te worden tegen vocht met een bitumineuze laag, of kan ook vervangen worden door een minder poreus materiaal, zoals betonsteen.

De vloeropbouw wordt geconstrueerd volgens de regels van goed vakmanschap. Op de gewapende betonplaat wordt een Polyurethaan isolatielaag gespoten van ongeveer 3 cm dik. Omdat deze PU-laag moet kunnen hechten aan de ondergrond, mag er hier geen waterkerende laag geplaatst worden op de gewapende betonplaat. Daarna wordt de chape gestort, als uitvullingslaag voor de leidingen. Vervolgens wordt de vloerafwerking geplaatst.

Eens de vloer af is, en men erop kan lopen, wordt de leidingspouw aangebracht. De ruimte tussen de leidingspouwstijlen wordt gevuld met minerale wol. Daarna wordt de leidingspouw afgewerkt met een gipskartonplaat.

Uiteraard dient een plint met een soepele voeg geplaatst te worden, om de gipskartonplaat te beschermen tegen vuil en vocht bij het poetsen van de vloer, om de wand te beschermen tegen mechanische schade, en om een onvolmaakte aansluiting tussen wand en vloer te maskeren.

Aangezien het houten kader inherent is aan het houtskeletbouwsysteem, wordt het niet beschouwd als een bouwknoop. Doordat echter het houtkader van de leidingspouw zich ter hoogte van het constructieve houtkader bevindt, hebben we te maken met extra warmteverlies; het hout heeft een hogere warmtegeleidbaarheid dan de isolatielaag. In dit geval past men het betreffende systeem van leidingspouw met isolatie toe om de luchtdichtheid van het gebouw te verzekeren, en ze zo min mogelijk te doorboren. Indien men echter een isolatiestrook plaatst in de luchtspouw, kan men het extra warmteverlies ter plaatse van de houtkaders verminderen.

Indien men ook isolatie in de luchtspouw plaatst, maar in totaal nog altijd dezelfde isolatiedikte behoudt, vermindert men de isolatiedikte nodig tussen de constructieve houtstijlen. Aldus zijn er minder grote afmetingen voor de houtstijlen- en regels nodig, wat vermoedelijk scheelt in kostprijs en in marktaanbod. Die isolatiestrook zou dan kunnen doorlopen tot aan het ondergronds metselwerk, althans als ze waterbestendig is. Zo zou de koudebrug ter hoogte van de sokkel kunnen opgelost worden.

Aangezien de warmte-isolatie van het wandpakket niet continu doorloopt in de isolatie van het vloerpakket, is de thermische snede niet gegarandeerd. Een oplossing zou zijn om gebruik te maken van een randisolatiestrook die de leidingspouwisolatie en de PUR-isolatie in de vloer met elkaar verbindt. Een andere optie is ook om één drukvast pakket vloerisolatie te gebruiken, in plaats van een isolatielaag onder de gewapende betonplaat en een laag PUR-isolatie erboven. Zo kan men de wandisolatie makkelijker doortrekken in de vloerisolatie en vormt men één doorlopende isolatielijn.

De afstand tussen het gevelmateriaal en de houtconstructie mag niet te klein zijn, zodat er geen te grote spanningen ontstaan in de spouwhaken als gevolg van de (thermische) werking van de twee onderdelen.

Door de randisolatie in de luchtspouw, daalt de ψ-waarde van -0,02 naar -0,04 W/mK. Het werkelijk warmteverlies wordt immers kleiner na de aanpassingen: van 24.06 W/m naar 23.65 W/m. Per meter bouwknoop is het warmteverlies dus met 0.41 W gedaald.

TYPEDETAIL PLAT DAK

Het betreft een warm dak. Dat wil zeggen dat de isolatie op de dakvloer komt te liggen, en dat er geen met buitenlucht geventileerde spouw aanwezig is tussen de verschillende lagen van de opbouw. [49]

Eens de wand opgebouwd is, wordt een wind- en waterdichte, dampopen folie, in dit geval Solitex UD, aangebracht, die luchtdicht aansluit op de luchtdichte laag van de wand, dit is op de binnenzijde van de Durélisplaat. De folie wordt overgeplooid naar de buitenzijde van de wandopbouw toe, en hangt daar tot de dakvloer af is.

Op de folie zou nog een muurplaat moeten komen, die fungeert als koppelregel voor de verschillende wandkasten, en als verdeelsteun voor de vloerbalken.

Wanneer de rand- en vloerbalken, het dakafschot, en de OSB-platen geplaatst zijn, kan de folie overgeplooid worden over de randbalk en OSB-plaat, weer naar binnen toe, waar ze strak en ononderbroken aan de constructie wordt bevestigd. Zo is de continuïteit van de luchtdichtheid verzekerd.

Het dakafschot wordt gerealiseerd door hellingsspieën. De dakvloer uit OSB 3 platen komt er dwars op te liggen. Daarop komt dan de bitumineuze laag, de PU-isolatie, en tenslotte de dakafdichting, om een waterdicht geheel te vormen. In betreffend typedetail is de dakafdichting éénlagig. De bitumineuze laag loopt door tot de bovenkant van de dakopstand, net als de EPDM-folie. Ter hoogte van de dakrand komt nog een tweede strook dakdichting, die wordt bevestigd op het aluminium dakrandprofiel.

Aan de dakrand dient een spouwafsluiting voorzien te worden die de luchtspouw luchtdicht afsluit van het dak, ter ondersteuning van het dakmembraan, en om de horizontale en verticale windbelasting op te vangen. Dit wordt vermeld in TV 191 van het WTCB [48]. Dit kan met een multiplexplaat.

Een geïsoleerde dakopstand in laddervorm hoeft in dit geval niet, omdat de stevigheid van de dakopstand al gegarandeerd wordt door de WBP-plaat, die over een voldoende lengte bevestigd is aan de wand.

De naad tussen de WBP-plaat en de houtvezelplaat, kan capillair water opzuigen. Om dit te voorkomen, kan er een universele kleefband gebruikt worden die de naad tussen de twee plaatmaterialen bedekt.

Daarna brengt men tussen de vloerbalken de randisolatie aan, ter hoogte van de randbalk. Dit doet men om de continuïteit van de isolatie van wand- en dakpakket te verzekeren.

In betreffend detail kan ter hoogte van de randbalk in het vloerpakket, condensatie optreden. De performantie van de randisolatie kan ook beter.

Indien men een dampscherm onderaan, net onder de roostering zou plaatsen, is dit niet helemaal zonder gevaren. In de praktijk gebeuren er nogal snel uitvoeringsfouten (bv. te lange schroeven gebruiken voor de bevestiging van de gipskartonplaten) en ook na bevestiging, kan er beschadiging ontstaan (bv. bij het ophangen van lichtarmaturen). Daarbij moet men het initieel vochtgehalte van het hout dan voorzien rond 17%; zelfs met een intelligent dampscherm.

Vaak plaatst men de dakisolatie tussen de structuur, dus niet zoals in dit typedetail op de structuur. De voordelen van een compact dak ten opzichte van een warm dak in het typedetail, zijn de volgende. Bij het compact dak is er een kleinere bouwhoogte, waardoor men minder gevelafwerking nodig heeft. Het binnenvolume is ook groter, en het geheel (uiteraard is dit subjectief), oogt minder log. Men hoeft geen drukvaste isolatie meer te voorzien bovenop de roostering, aangezien de isolatie zich al tussen de constructie bevindt.

Maar ook in het geval van een compact dak, moet het dampscherm onderaan de roostering voorzien worden en kunnen er uitvoeringsfouten (bij de aansluiting tussen de verschillende damprembanen en de aansluiting met andere constructie-onderdelen, moet gewerkt worden met tapes om alles dampdicht te krijgen) en beschadiging voorkomen. Het is daarenboven optimaal het dampscherm te kunnen uitvoeren op een continue drager.

Een betere oplossing is een dampscherm te voorzien langs de zijkant van de randstroken isolatie. Het dampscherm wordt dan vastgemaakt met daartoe voorziene kleefband aan de OSB-plaat, die eveneens damp- en luchtdicht is.

De leidingspouw kan worden geconstrueerd, tegen de wand en het plafond. De leidingspouw tegen de wand wordt gevuld met minerale wol.

Alternatieve aanbeveling voor de opbouw: De randbalk in de dakvloer kunnen we eigenlijk als dampremmend beschouwen. Aangezien deze zich aan de buitenzijde van de constructie bevindt, en men aan de buitenzijde steeds een dampopen laag moet gebruiken, kan men eerst nog een dampopen isolatiestrook aanbrengen aan de buitenzijde van de randbalk. Die isolatielaag kan afgewisseld door houten stijlen, doorlopen tot aan de dakopstand, en zo een stijve dakopstand vormen. De excentrische belasting van de roostering op de HSB-wand die zo ontstaat, vormt geen probleem.

Op deze manier hoeft de omslachtige bevestiging van de stroken dampremmende laag tussen de roostering niet te gebeuren.

TYPEDETAIL HELLEND DAK

Het typedetail is een spantendak.

Op de bovenregel van de wandopbouw, dient een koppelregel voorzien te worden die de verschillende wandkasten met elkaar verbindt, en dient als verdeelsteun voor de vloerbalken.

Eens de wand opgebouwd is, wordt een wind- en waterdichte, dampopen folie, in dit geval Solitex UD, aangebracht, die luchtdicht aansluit op de luchtdichte laag van de wand, dit is op de binnenzijde van de Durélisplaat. De folie wordt overgeplooid naar de buitenzijde van de wandopbouw toe, en hangt daar tot de dakvloer af is.

Wanneer de rand- en vloerbalken en de OSB-platen geplaatst zijn, kan de folie overgeplooid worden over de randbalk en OSB-plaat, weer naar binnen toe, tot waar later de luchtdichting van de zolderwand zal komen.

De dakconstructie wordt gemonteerd. Tussen de keperspanten worden klossen geplaatst, die knik van de spanten beletten.

Onder de menuiseriteplaat, die het onderdak vormt, bevestigt men een afwateringsfolie, die tot in de dakgoot loopt, en zo de afwatering van het onderdak in de dakgoot leidt.

Eventueel kan men de menuiseriteplaat vervangen door een houtvezelplaat, die uit nagroeibare materialen is vervaardigd, en een veel lagere warmtegeleidingscoëfficiënt heeft dan menuiserite (0,045 W/mK ten opzichte van 0,18 W/mK). De 22mm dikke houtvezelplaten kunnen een -weliswaar beperkte- invloed uitoefenen op de 'koudebrugwerking' van de keperspanten. De houtvezelplaat heeft ook een tand- en groefbevestiging, die minder wind en vocht zou doorlaten dan een menuiseriteplaat. De afwateringsfolie wordt dan vastgemaakt in de tand- en groefverbinding tussen de onderste laag houtvezelplaten, en doorgetrokken tot in de goot. Na simulatie in Bisco, neemt de lineaire warmteovergangscoëfficiënt een weinig toe (van -0.06 naar -0.3 W/mK). Dit is te verklaren vanuit het feit dat de U-waarde van het dak is gedaald door het beter isolerend vermogen van de houtvezelplaat.

De ruimte tussen de keperspanten wordt opgevuld met dampopen isolatiemateriaal (minerale wol λ=0,040 W/mK). Aan de onderzijde van de keperspanten plaatst men een dampremmende laag, die condensatie in de houten structuur vermijdt. De damprembanen dienen voldoende overlap te hebben, en worden vastgemaakt met nieten. De dampremmende laag die continu verbonden is met de durélisplaat in de wandopbouw, wordt aan de onderzijde van de leidingspouw van de zolderwand, strak

en ononderbroken aan de constructie bevestigd. Om ook een luchtdichte aansluiting met de dampremmende laag (vb. Pro Clima DA+, d. i. een lichtjes vochtgestuurde damprem) van de zolderwand te maken, overlappen ze voldoende. Daarna worden alle naden, ook die met andere constructiedelen, luchtdicht afgekleefd met daartoe voorziene tape.

Het zou beter zijn te isoleren over de volledige hoogte van de keperspanten, omdat het hout dan minder makkelijk kan worden aangetast door insecten.

De dampremmende laag van de zolderwand kan eventueel ook een vochtgestuurde damprem zijn.

Vervolgens kan men de leidingspouw construeren tegen de wand en het plafond. Om doorboringen van het dampscherm te vermijden, dient men zich te verzekeren van de lengte van de schroeven, waarmee de gipskartonplaten zullen bevestigd worden.

Eventueel kan men ook de leidingspouw tegen de zolderwand isoleren.

Bovenaan het gevelmetselwerk, net onder de kroonlijst, moeten open stootvoegen voorzien worden, die een goede verluchting van de luchtspouw toelaten.

Op de menuiseriteplaat komen respectievelijk de tengellatten en de panlatten.

De bebording en de boordplank worden aangebracht, om de dakgoot te bevestigen en te ondersteunen.

De bebording als bevestigingsbasis voor de dakgoot, zorgt er in betreffend typedetail voor dat er een geul ontstaat waarin water kan blijven staan. Plaatselijk kan men een uitsparing maken in de keperspanten waarop de bebording kan rusten, ofwel kan men de bebording aanbrengen tussen de spanten.

Tenslotte wordt ook de dakbedekking aangebracht. In dit geval gaat het om dakpannen.

Normaalgezien heeft de onderste dakpannenrij dezelfde helling als de bovenliggende dakpannen. Dit kan bijvoorbeeld verwezenlijkt worden door onder het uiteinde van de laatste dakpan - die korter is dan de andere en ook wel voetpan wordt genoemd - een dubbele panlat te voorzien.

Eventueel kan men de isolatie die de contouren van de gebruikte ruimte volgt, zoals op bijgevoegd typedetail, vervangen door een isolatiestrook die het dakvlak volgt, en tussen de dakspanten wordt geklemd. Zo heeft men minder plaatsverlies, en heeft men minder isolatie nodig. De isolatie in de draagvloer moet dan wel doorgetrokken worden tot aan de randbalk.

Het gevelafwerkingsmateriaal wordt opgetrokken volgens de regels van de kunst.

De randisolatie wordt langs de randbalk geplaatst, zodat de continuïteit met de isolatielagen van wandopbouw en dakopbouw gerealiseerd wordt. Tussen de roostering van de dakvloer steekt men minerale wol, ter hoogte van de gebruikte zolderruimte.

Net zoals bij het platte dak, is het ook hier aangewezen dat er een dampremmende laag komt langs de randisolatie, om condensatie ter hoogte van de randbalk te vermijden. Dit gebeurt dan telkens in korte stroken, tussen de roostering, die aansluiten op de dampremmende laag van het dak, in dit geval de OSB-plaat.

Eventueel kan men een afscherming realiseren onderaan de 'dakoversteek', om te vermijden dat er wind in de dakconstructie geblazen wordt, dat er opstijgende warme lucht terechtkomt in de isolatie en dat er insecten en ander ongedierte in het dak kruipen. Dit kan door een houten constructie in retour aan te brengen, of de holte op te spuiten met PU-isolatie, of door bijvoorbeeld een Pro Clima Solitex UD folie aan te brengen.

Na de aanpassingen aan het typedetail, is het dak beter thermisch isolerend, waardoor de invloed van de bouwknoop stijgt. De ψ-waarde gaat van -0.06 naar -0.03 W/mK.

Alternatieve aanbeveling voor de opbouw: Indien men veronderstelt dat de randbalk dampremmend is, kan men de randbalk aan de binnenzijde van de isolatie plaatsen. Het is belangrijk dat de isolatie aan de buitenzijde van de randbalk dan dampopen is. Tussen de randbalk en deze isolatielaag komt dan een dampopen laag (vb. Pro Clima Solitex UD), zodat de randbalk maximaal kan uitdrogen. De wachtfolie wordt doorgetrokken over de OSB van de dakvloer, tot aan de aansluiting met de dampremmende laag van het hellend dak. Aan de binnenzijde van de randbalk kan dan nog een deel van de isolatie geplaatst worden. Dit alternatief is vermoedelijk wat omslachtiger dan de vorige methode, maar zal wat betreft de dampremmende lagen wat eenvoudiger uit te voeren zijn, omdat men de stroken damprem tussen de roostering niet meer moet toepassen.

6.6 Zes vuistregels voor een duurzame houten gevel

Voor gevelbekleding geldt een toepassing in gebruiksklasse 3. De houtsoorten die onverduurzaamd kunnen gebruikt worden, dienen een natuurlijke duurzaamheid te hebben die minimaal overeenstemt met duurzaamheidsklasse III. Ook thermisch gemodificeerd hout kan voor gevelbekleding gebruikt worden, en laat toe om houtsoorten uit een duurzaamheidsklasse IV of V toe te passen.

De gevelbekleding bestaat meestal uit horizontale of verticale gevelbeplanking. Diagonale planken worden meestal niet gebruikt, omdat de aansluiting bij ramen en deuren en op hoeken nogal omslachtig is.

De horizontale gevelbekleding wordt aangebracht op verticale latten. De verticale gevelbekleding wordt aangebracht op horizontale latten, die op een verticaal regelwerk zijn bevestigd. Dit is nodig omdat, met enkel de horizontale latten, het water niet voldoende kan afgevoerd worden (vergelijk met de functie van de tengellatten bij een hellend dak). Verticale planken geleiden het water over het algemeen beter dan horizontale beplanking.

Hieronder worden een aantal vuistregels opgesteld, waarop een duurzame houten gevel gebaseerd is. Het ontwerp en de uitvoering van de gevel steunen op deze principes, maar worden in dit werk niet meer aangehaald. Uiteraard moet men steeds een houtsoort gebruiken aangepast aan de gebruiksklasse.

Fig 7152 Verticale gevelbekleding (Hotel B&B, Rijsel); Horizontale gevelbekleding [72]

1. De buitenkant moet altijd meer dampopen zijn dan de binnenkant.

Voorbeeld: Houten gevelmateriaal. Het is niet aan te raden de buitenkant te schilderen met een dampdichte verf, en de binnenkant onafgewerkt te laten. Hierdoor raakt vocht ingesloten in het hout, terwijl het niet genoeg blootgesteld is aan de buitenlucht om te kunnen ontsnappen.

Het is eveneens geen goede zaak zowel de binnen- als buitenkant van het gevelmateriaal dampdicht af te werken. Indien er aan de binnenkant een kleine beschadiging van het houtoppervlak zou optreden, kan het vocht langs daar het hout binnendiffunderen, en stapelt het op aan de binnenzijde van de buitenkant van het gevelmateriaal. Aangezien men meestal de buitenzijde van het hout wil afwerken om de visuele eigenschappen ervan te behouden, is het dus aangewezen om de binnenzijde van het materiaal ook af te werken en om de buitenzijde met een dampopen materiaal af te werken. De binnenzijde hoeft niet noodzakelijk afgewerkt te worden, als de luchtspouw achter de bekleding voldoende geventileerd is.

Indien men het hout helemaal niet afwerkt, is er natuurlijk geen probleem met vochtopstapeling. Onbehandeld zal het hout verweren onder invloed van UV-straling, wind, temperatuurschommelingen, ... De gevel zal in de loop van de jaren egaal vergrijzen. Voor gevels heeft de verwering geen ernstige gevolgen.

2. De vochtaanvoer op de gevel zoveel mogelijk beperken.

- Bescherm het hout op een constructieve manier. Door middel van een dakoversteek bijvoorbeeld, kan men de vochtbelasting op de gevel aanzienlijk verminderen. De oversteek moet voldoende groot zijn, omdat anders enkel het bovenste deel van de gevelbekleding beschermd wordt, waardoor een ongelijkmatige vergrijzing optreedt. Met deze ingreep kan gebruiksklasse 2 van toepassing zijn.
- Vermijd direct contact van het hout met de grond. Voor hout in contact met de grond, of met water, geldt gebruiksklasse 4. Door een houten kolom bijvoorbeeld op een metalen voet te plaatsen, kan de gebruiksklasse al verlaagd worden tot 3.
- Voorkom opspattend water. Men kan opspattend vocht voorkomen door de gevelbekleding 30 cm boven het maaiveld te laten stoppen. Zo maakt de onderste plank ook geen contact met opgehoopte sneeuw. Een tweede oplossing is om de gevelbekleding te laten doorlopen, maar de onderste gevelplanken in een duurzamere houtsoort uit te voeren, of zorgen dat ze makkelijk te vervangen zijn. Uiteraard is dit bij verticale gevelbekleding niet zo vanzelfsprekend. Een derde optie is om een verzonken goot te voorzien, of een strook grind, waardoor de gevelbekleding tot ongeveer 10 cm boven het maaiveld mag komen.

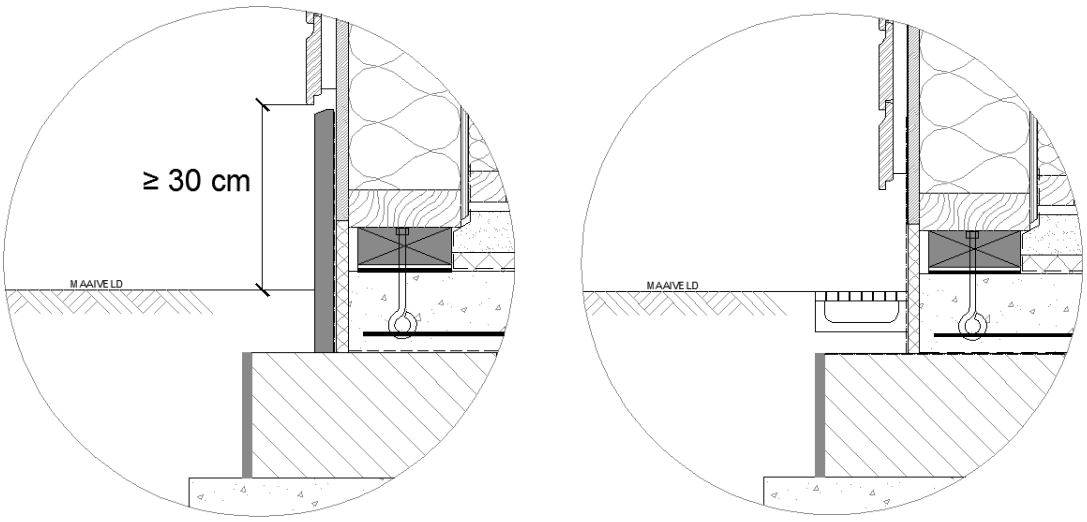


Fig 7253 Voorkom opspattend water

- Wat betreft de oriëntatie, heeft de zuidwestelijke gevel de grootste vochtbelasting. Met behulp van een dakoversteek, die tegelijk ook als zonwering kan dienen, of beplanting, een hek, ... kan de vochtbelasting verminderd worden.
- Door een houtafwerking op het hout aan te brengen, kan het vocht niet in het hout dringen, maar loopt het er langs het oppervlak weer af. Een afwerking moet echter wel regelmatig gecontroleerd en onderhouden worden, opdat de afwerking geen averechts effect creëert.

3. *De vochtafvoer zoveel mogelijk bevorderen.*

- De profilering van de gevelplanken is er best op voorzien vocht zo vlot mogelijk af te voeren. Aan afgeronde randen blijven geen waterdruppels hangen, en aangebrachte verf zal minder snel barsten dan op een scherpe rand. Door de planken onderaan schuin af te zagen, ontstaat een druiprand.
  Bij horizontale planken met een tand en groef bevestiging moet de tand naar boven gericht zijn. Indien men de groef naar boven zou richten, kan het water in het geultje van de groef blijven staan.

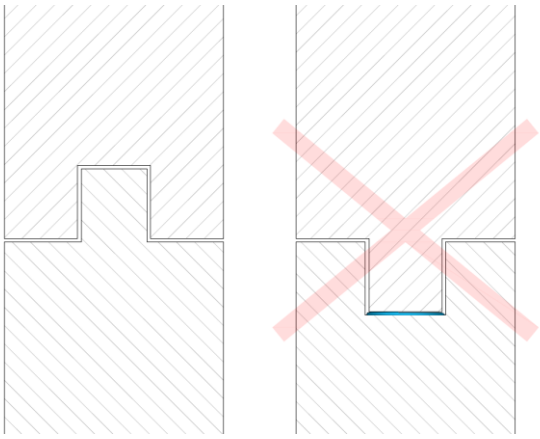


Fig 73 Breng de plaat aan met de tand naar boven gericht.

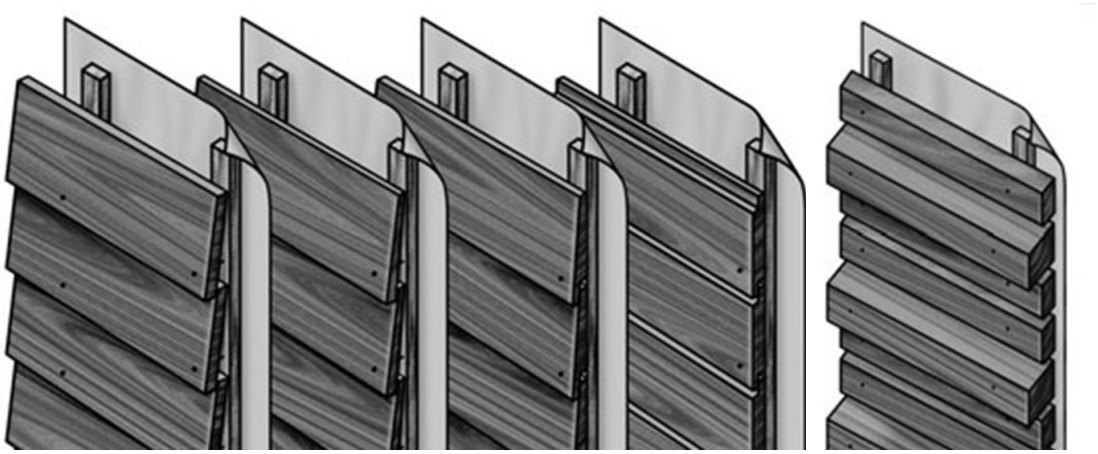


Fig 74 Profilering horizontale gevelbekleding. V.l.n.r. potdekselwerk, bevelsiding, Zweeds rabat en halfhouts rabat, horizontale open gevelbekleding [41]

Bij verticale planken moet men bij de plaatsing rekening houden met de overheersende wind- en regenrichting. De planken worden zo geplaatst, dat de groefzijde van de plaat zich in dezelfde richting als de windrichting bevindt, en de tand tegen de windrichting in wordt geplaatst.

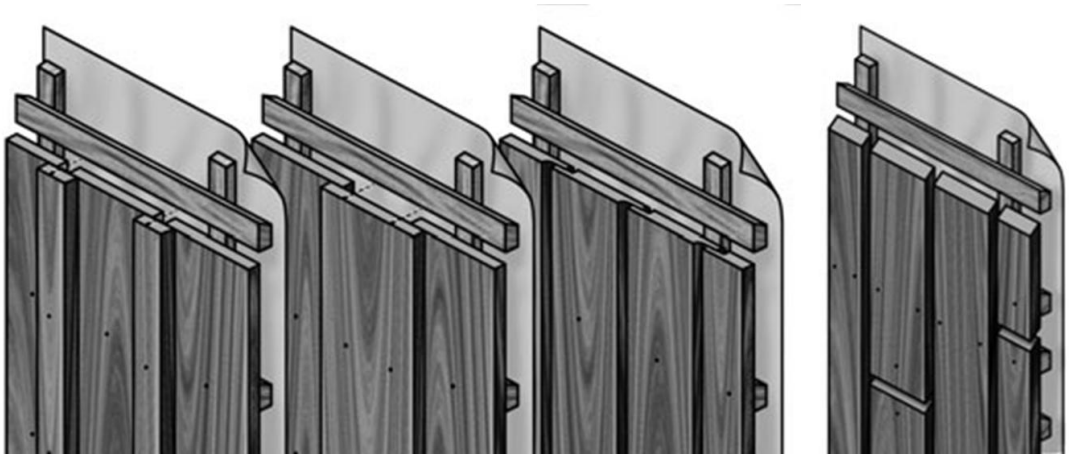


Fig 75 Profilering verticale gevelbekleding. V.l.n.r. opdekwerk, opdekwerk en rabat met halfhoutse overlap (Channel siding), verticale open gevelbekleding [41]

4. Voorkom vochtopstapeling.

Het vochtig zijn van het hout, vormt op zich geen probleem, zolang het hout maar voldoende kan drogen. Vooral in België, met het wisselend klimaat, is dit van belang.

- Voorkom capillaire naden. Aangezien langs de kopse zijde (d.i. het uiteinde) van een houten plank het vocht makkelijk tussen de vezels kan dringen, is het belangrijk deze af te dekken. Ter hoogte van de voeg tussen twee verschillende horizontale planken, kan water capillair vastgehouden worden. Aangezien dit de kopse kanten van de planken zijn, wordt het vocht makkelijk opgezogen. De zone rond de voeg droogt na bevochtiging niet snel uit, waardoor er een reëel risico op

blauwschimmel is. Om te voorkomen dat het water capillair wordt vastgehouden, dient de voeg tussen de planken breder te zijn dan 8 mm. Om het kops hout bij de horizontale gevelbekleding volledig af te dekken, kan men een houten lat aanbrengen op de naden.

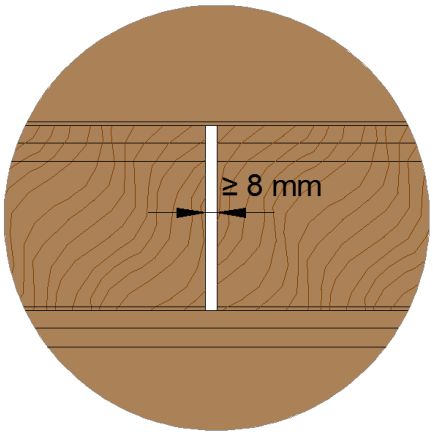


Fig 76 De voeg tussen de planken moet breder zijn dan 8mm, om capillaire opzuiging te vermijden.

Vooral bij horizontale gevelbekleding, komen er voegen tussen het kopse hout van planken voor. In onderstaande figuur zijn een paar voorstellen afgebeeld ter bescherming van die kopse kanten. De figuur stelt telkens een horizontale doorsnede voor van een buitenhoek.

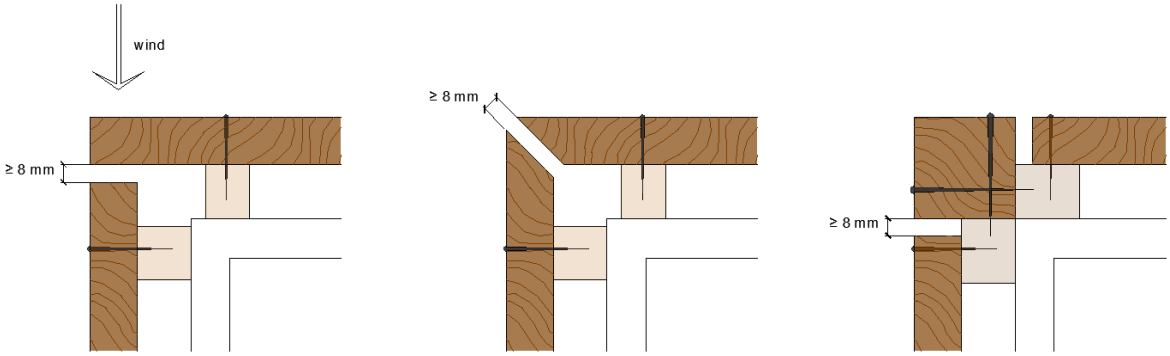


Fig 77 De voeg tussen de planken moet breder zijn dan 8mm, om capillaire opzuiging te vermijden.

- Voorzie voldoende verluchting. Een goede verluchting is noodzakelijk opdat het hout na bevochtiging goed kan drogen. De verluchtingsspouw moet minstens 2 cm breed zijn. Eventueel kan het horizontale regelwerk bij verticale gevelbekleding ook weggelaten worden, indien de lengte van de horizontale regels niet te groot is, en de naden tussen de verschillende regels ten opzichte van elkaar verspringen. Zo kan de luchtdoorgang toch nog verzekerd worden. In het geval van de linkerfoto op figuur 70 is ook geen verticaal regelwerk meer nodig, omdat de wind al voldoende onder de houten gevelbekleding door kan.

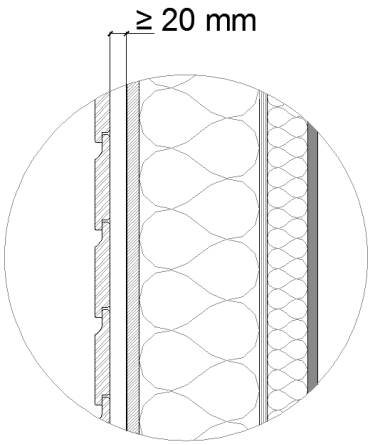


Fig 7854 De verluchtingsspouw moet minimum 2 cm breed zijn, zodat het hout bij bevochtiging voldoende kan drogen.

Boven- en onderaan de gevelbekleding moet men verluchtingsspleten laten met een voldoende grote oppervlakte, die afhankelijk is van de grootte van het geveloppervlak. De grootte van de mazen van het regelwerk, is evenredig met de dikte van de gevelplanken. Als vuistregel kan men een afstand nemen gelijk aan 25 keer de dikte van de gevelplank. In het geval van de tekening, is de dikte van de gevelplank 2,2cm, zodat de afstand tussen de verticale regels ongeveer 55 cm moet bedragen.

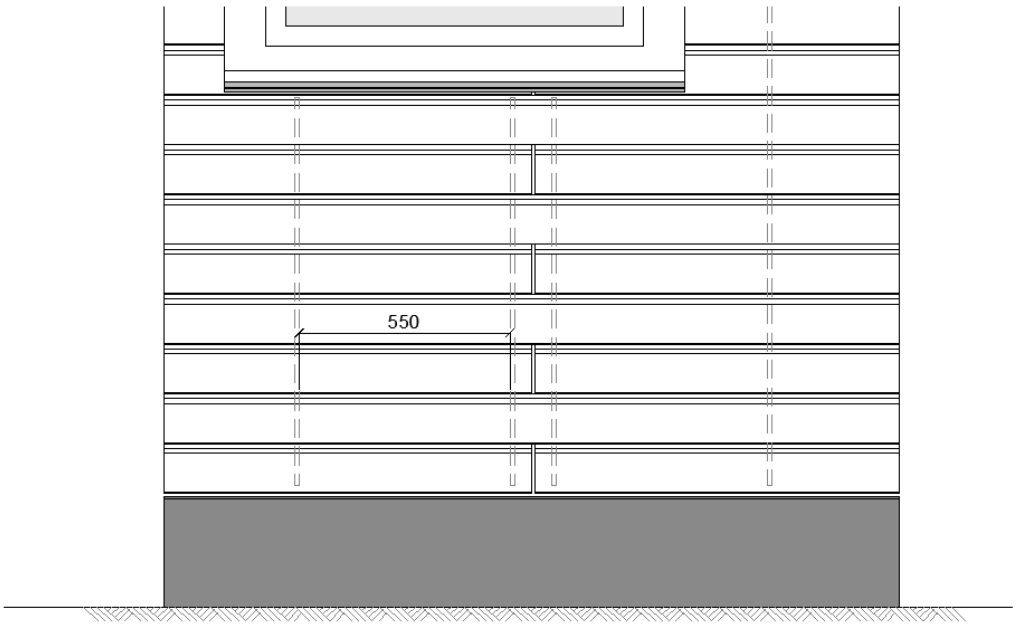


Fig 79 In betreffend geval is de breedte van de maasopening gelijk aan 55cm.

- Vanzelfsprekend drogen grote doorsneden veel minder snel dan doorsneden met beperkte afmetingen.
- Met bepaalde houtafwerkingsproducten kan men ervoor zorgen dat vocht minder makkelijk opgenomen wordt door het hout.

5. *Hout werkt.*

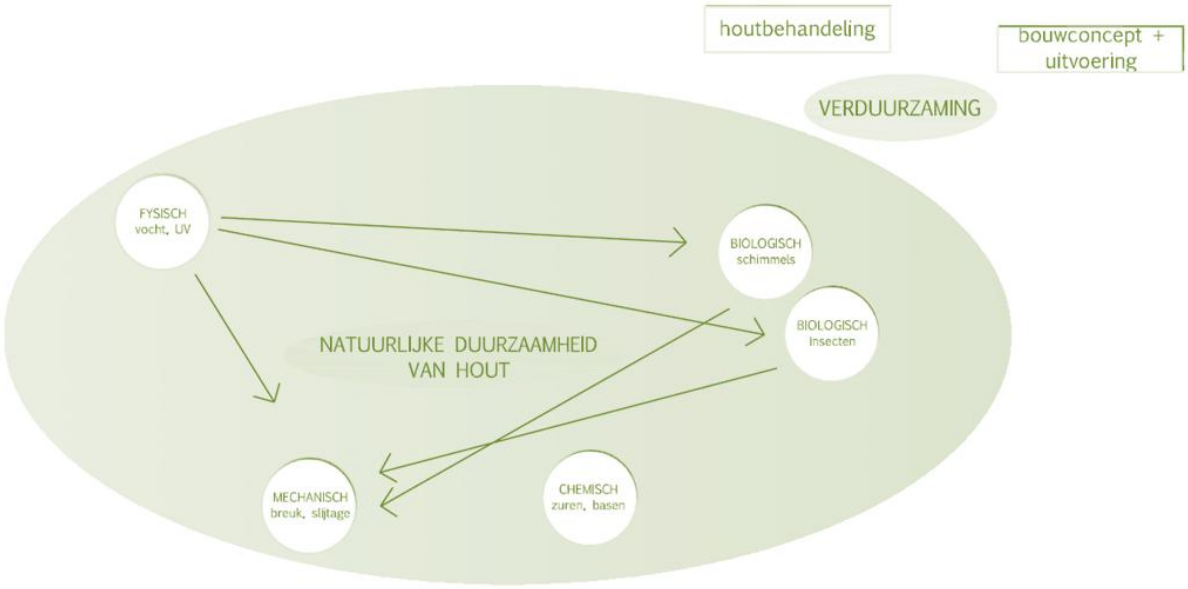
- Hout is een hygroscopisch materiaal, en zal dus zwellen en krimpen onder invloed van vochtveranderingen. Voor een gevelafwerking mogen de afmetingen van het hout veranderen, zolang die beweging mogelijk gemaakt wordt door een voldoende grote spatie te voorzien tussen de verschillende gevelelementen. Indien de vormverandering niet toegelaten wordt, ontstaan er spanningen en bijgevolg barsten in het hout, waarin vocht zich kan ophopen.

6. *Bevestig het hout op een juiste manier*

- De houten gevelplanken worden bevestigd met roestvaste stalen nagels of schroeven. Om kopscheuren te vermijden, dienen ze op minimum 50 mm van het uiteinde te worden bevestigd. Indien men een kleinere afstand van het uiteinde dient te nemen, of het hout harder is, of gemodificeerd, doet men er goed aan de gaten eerst voor te boren. Bij de tussenbevestigingspunten, is de in acht te nemen afstand vanaf de rand, minimaal 15 mm. Elke plank moet afzonderlijk aan het regelwerk worden bevestigd; bij het vastmaken van meerdere planken per schroef, wordt het werken van het hout verhinderd.
- Bij het plaatsen van de planken, dient men rekening te houden met de zaagwijze ervan. Op dosse gezaagd hout zal altijd kromtrekken. Afhankelijk van welke zijde naar de constructie gericht is, zal het hout bol of hol gaan staan. Op kwartier gezaagd hout is redelijk vormvast.

7. Conclusie

De duurzaamheid op bouwtechnisch vlak wordt erg bepaald door de kenmerkende eigenschappen van het materiaal hout. De eigenschappen zijn totaal verschillend aan die van bijvoorbeeld staal, beton of baksteen. Hout zwelt en krimpt, is een materiaal dat 'werkt'. Het is een natuurlijk materiaal dat vatbaar is voor biologische, mechanische, chemische en fysische aantasting. Indien de natuurlijke duurzaamheid van het hout niet volstaat voor een toepassing met een te lage gebruiksklasse (dus een te agressieve omgeving), kan het hout verduurzaamd worden. Door 'protection by design' en een goede uitvoering enerzijds, en door een houtbehandeling anderzijds, kan men de schade flink inperken.



Op het vlak van ecologische duurzaamheid, is gebleken uit het literatuuronderzoek dat wat de LCA betreft, de 'embodied energy' (de energie nodig om het lage-energieconcept te realiseren) van een houtskeletsysteem niet zozeer verschilt van andere, traditionele systemen. De 'global warming potential' is negatief, omdat hout tijdens zijn levensduur CO_2 opslaat in zijn massa. Duurzaam bosbeheer kan gegarandeerd worden door onder andere het FSC- en het PEFC-label.

Om warmteverlies te beperken en het milieu te sparen, wordt sinds een aantal jaren een nieuwe bouwmethode toegepast. Deze bouwmethode wordt gekenmerkt door dikke isolatielagen en idealiter een perfect luchtdicht uitgevoerde schil. Het besef is er immers gekomen dat warmteverlies door spleten en kieren zoveel mogelijk moet vermeden worden. Deze bouwmethode brengt echter een nieuwe problematiek met zich mee.

Door de luchtdichtheid, bijvoorbeeld in een plat dak waarin de isolatie dampdicht is ingesloten, kan in geval van een kleine spleet in de luchtdichtheid, of een slechte uitvoering, vocht in de structuur dringen die door de luchtdichtheid niet meer

voldoende kan uitdrogen en schade (houtrot, verminderde thermische prestatie van de isolatie, ...) kan veroorzaken.

Ten tweede verdwijnt door de luchtdichtheid de mogelijkheid op natuurlijke ventilatie. De gebruikers hebben een grote invloed op de vochtbelasting in het binnenklimaat. Indien ze niet voldoende ventileren, of een te grote vochtbelasting creëren, kan er schade ontstaan door schimmels en oppervlaktecondensatie.

Tenslotte vergroot door de betere thermische prestatie van de bouwdelen, de impact van bouwknopen. Lokaal kan oppervlaktecondensatie ontstaan, met schimmels tot gevolg.

De praktische uitvoering of 'best practice' ter voorkoming van deze problemen, is de volgende:

- Voorzie de meest dampopen materialen aan de buitenzijde van de bouwschil. De binnenzijde moet dampdichter zijn dan de buitenzijde, maar niet dampdichter dan noodzakelijk.
- Realiseer een ononderbroken luchtdichting aan de warme zijde van de isolatielaag. Zo is de isolatielaag beschermd tegen vochtbelasting vanuit het binnenklimaat. Schade tijdens de uitvoering of tijdens gebruik moet zoveel mogelijk vermeden worden.
- Plaats de best isolerende materialen zo ver mogelijk naar buiten. Zo blijft de bouwschil warm en is er minder kans op condensatie en vorstschade aan de buitenzijde.
- Koudebruggen moeten vermeden worden. Ze zijn een zwakke plek voor oppervlaktecondensatie en schimmels door de lage temperatuur aan het oppervlak.
- De relatieve vochtigheid in het binnenklimaat mag niet te hoog zijn. Ventileer voldoende en houdt de vochtbelasting over het algemeen laag. Om schimmels te vermijden, moet de RV aan het oppervlak kleiner zijn dan 0.8. Om schimmels te vermijden, moet het vochtgehalte aan het oppervlak niet alleen laag gehouden worden, maar kan men ook een minder gunstig klimaat creëren door het hout te behandelen met toxische stoffen en door een voedingsbodem te kiezen die niet gegeerd is bij schimmels, zoals uit substraatklasse 2.

Voor vier veel gebruikte typedetails van houtskeletbouw werd in Bisco de lineaire warmtedoorgangscoëfficiënt (ψ-waarde) bepaald. De bouwknopen werden eveneens getoetst aan de basisregels voor koudebrugarme bouwknopen. Daaruit bleek dat de typedetails, uitgezonderd schrijnwerk, allemaal EPB-aanvaard waren.

Het risico op schimmelvorming werd geëvalueerd met behulp van het simulatie-programma WUFI, dat ontwikkeld werd door Sedlbauer, en gebaseerd is op het biohygrothermisch model en op de isopleten.

WUFI toonde aan dat het risico op schimmelvorming erg klein was, zelfs ter hoogte van een slecht geconcipieerde bouwknoop (de funderingsaansluiting met de wand). Het risico werd sterk verhoogd indien er een extra vochtbelasting kwam door een lek in de leidingspouw of door een binnenklimaatklasse 4 i.p.v. binnenklimaatklasse 3 te veronderstellen. De invloed van de parameters van de buitenste materiaallaag (luchtspouw en buitenspouwblad buiten beschouwing gelaten), de houtwolplaat, werd onderzocht. Deze hadden uiteindelijk niet veel invloed op het totale vochtgehalte in de constructie en op de uitdrogingscapaciteit.

Er worden aanbevelingen gegeven om de typedetails meer duurzaam te maken. Dit zijn aanbevelingen op hygrisch, thermisch, praktisch, ... vlak.

Daarnaast werd ook de 'best practice' voor de duurzaamheid van een houten gevelbekleding opgesteld. Er zijn 6 vuistregels die schade voorkomen:

1. De buitenkant moet altijd meer dampopen zijn dan de binnenkant (= zelfde principe als bij de nieuwe bouwmethode)
2. Vochtaanvoer beperken (door verduurzaming en 'protection by design')
3. Vochtafvoer bevorderen (door profilering)
4. Vochtopstapeling voorkomen (vermijd capillaire naden, bescherm hout en voorzie verluchting)
5. Rekening houden met 'werken' van hout
6. Hout op juiste manier bevestigen.

Het antwoord op de vraag die geformuleerd werd in de inleiding, namelijk 'Is het verstandig om te bouwen met hout in het Belgische gemengd klimaat', blijkt positief te zijn. Houtskeletbouw wordt nu nog niet zoveel toegepast in België, maar belooft door de klimaatverandering en het bewustzijn dat de meeste energiebronnen niet onuitputbaar zijn, een sterkte stijging in het marktaandeel te kennen. Om houtskeletbouw op een correcte manier toe te passen is het belangrijk het basisgedrag van het materiaal hout te kennen. Goed doordachte bouwdetails en een goede uitvoering zijn cruciaal om schade te vermijden. Pas zo kan houtskeletbouw een waardig alternatief vormen voor de traditionele bouwmethoden in België.

8. Bijlagen

8.1 Bijlage 1: Het gedrag bij brand van hout(en constructies)

8.2 Bijlage 2: Gedetailleerde berekening ψ-waardes

8.3 Bijlage 3: Zijn de typedetails EPB-aanvaard?

8.4 Bijlage 4: Vergelijking tussen het Belgische klimaat (Ukkel) en het klimaat in Kassel (Duitsland)

8.5 Bijlage 5: Typedetails

8.6 Bijlage 6: Gevel

Referenties

De volgorde van de referenties is gebaseerd op de alfabetische rangschikking der auteursnamen, naargelang de oorsprong van de referentie.

Boeken

[1] Cattrijsse W., A2105-1 Aantasting door schimmels, Handboek bouwgebreken, Diegem, Kluwer Editorial, 1995, 17-51.

[2] Cattrijsse W., A2105-5 Aantasting van hout – algemeen, Handboek bouwgebreken, Diegem, Kluwer Editorial, 1995, 27-47.

[3] Cattrijsse W., A2105-6 Aantasting van hout door huiszwam, Handboek bouwgebreken, Diegem, Kluwer Editorial, 1995, 49-72.

[4] Geldof P., Hayen R., Thoelen P., Van Dyck B., Duurzaam zonder verduurzaming. Over duurzaam houtgebruik zonder preventieve chemische behandeling, VIBE vzw, 2005.

[5] Simpson W., Ten Wolde A., Wood Handbook - Wood as an engineering material, Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, Madison, 1999.

[6] Stichting Bouwresearch, Handboek Houtskeletbouw: Ontwerp, techniek en uitvoering, 1e druk, Deventer, Kluwer Technische Boeken B.V., 2005.

Tijdschriften

[7] Belgian Woodforum, Houtsoortenkeuze voor de meest voorkomende houttoepassingen, Houtnieuws 148 (2005), 17-20.

[8] Bongers F., Acetyleren van hout, Houtnieuws 171 (2010), 20-23.

[9] Broeckx E., Winnepenninckx E., Bouwpakketten en bouwsystemen, WTCB tijdschrift (2003) n°4, 45-53.

[10] Charron S., Specifieke houteigenschappen en invloed op de afwerkingssystemen, Houtnieuws 156 (2007), 19-20.

[11] Contesse A., Skelet van hout, A+222, maart 2010, 92-96.

[12] Decaesstecker C., Aantasting van binnenschrijnwerk door de spinthoutkever, WTCB tijdschrift (lente 1996) n°1, 29-33.

[13] Defays E., Bos- en houtproducten, een koolstofopslagplaats, Houtnieuws 150 (2005), 29-32.

[14] Dobbels F., Hoe lichte constructies luchtdicht maken?, Houtnieuws 158 (2007), 12-13.

[15] Hoste G., Het loskomen en vervormen van parketvloeren, WTCB tijdschrift (1993) n°3, 30-35.

[16] Hoydonckx H., Biomodificatie: furfuryleringstechnologie, Houtnieuws 170 (2010), 29.

[17] Lstiburek J., Moisture Control for Buildings, ASHRAE Journal 44 (februari 2002) n°2, 36-41.

[18] Scheffer T., A Climate Index for Estimating Potential for Decay in Wood Structures Above Ground, Forest Products Journal 21 (oktober 1971) n°10, 25-31.

[19] Sedlbauer K., Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation, Journal of Building Physics 25 (april 2002) n°4, 321-336.

[20] Van Acker J., Stevens M., Hittebehandeld hout, Houtnieuws 146 (2004), 21-28.

[21] Vandooren O., Uitvoering van houten vloerbedekkingen, WTCB tijdschrift (2003) n°1, 26-31.

[22] Van Leemput M., STS'en over hout herzien, Houtnieuws 168 (2010), 20-22.

[23] Viitanen H., Ojanen T., Improved model to predict mold growth in building materials, The proceeding of thermal performance of the exterior envelopes of the whole buildings X international conference, paper # 162 (2007), Ashrea, 1-8.

[24] Vzw Hout, Troeven van bouwen met hout, Houtnieuws 141 (2003), 15-21.

[25] Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, Onderbreking van koudebruggen in uitrkagende betonconstructies, WTCB tijdschrift (winter 1998), 5.

[26] Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, Dakisolatie: waar precies en met welk materiaal?, Houtnieuws 158 (2007), 7-10.

Wetenschappelijke artikels

[27] Börjesson P., Gustavsson L., Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives. Energy Policy 28 (2000), 575-588.

[28] Carll C.G., Highley T.L., Decay of Wood and Wood-Based Products Above Ground in Buildings, Journal of Testing and Evaluation JTEVA 27 (maart 1999) n°2, 150-158.

[29] Edlund M.-L., Nilsson T., Testing the durability of wood, Materials and Structures 31 (November 1998) n°9, 641-647.

[30] Ekstrand-Tobin A., Isaksson T., Johansson P., Thelandersson S., Critical conditions for onset of mould growth under varying climate conditions, Building and Environment 45 (2010), 1712-1721.

[31] Hagentoft C.E., IEA Annex 24, Final report Volume 5, Task 5: Performances and Practice: The impact of heat, air, and moisture transport on energy demand and durability. Energy conservation in buildings and community systems, K.U. Leuven, 1998.

[32] Homan W.J., Jorissen A.J.M., Wood modification developments, Heron 49 (2004) n°4, 361-385.

[33] Hovde P.J., Factor methods for service life prediction. A state-of-the-art. Report of CIB W80/RILEM TC 175-SLM, Norwegian University of Science and Technology, Dept. of Building and Construction Engineering, Trondheim, Norway. Mei 2000.

[34] Isaksson T., Thelandersson S., Ekstrand-Tobin A., Johansson P., Critical conditions for onset of mould growth under varying climate conditions, Building and Environment 45 (2010), 1712-1721.

[35] Krus M., Künzel H.M., Sedlbauer K., Zillig W., A new model for mould prediction and its application on a test roof, II International Scientific Conference on 'The current problems of building-physics in the rural building', Kraków, Polen, november 2001.

[36] Krus M., Sedlbauer K., Mould growth prediction by computational simulation, presentatie in: Museum Microclimates Conference Proceedings, Kopenhagen, Fraunhofer-Institut Bauphysik, Holzkirchen, 2007.

[37] Kus H., Norén J., Westberg K., On using available environmental data in service life estimations, Building Research & Information 29 (2001) n°6, 428-439.

[38] Lenzen M., Treloar G., Embodied energy in buildings: wood versus concrete – reply to Börjesson and Gustavsson, Energy Policy 30 (2002), 249-255.

[39] Viitanen H., Factors affecting mould growth on kiln dried wood, 3rd European COST E15 Workshop on wood drying: Softwood drying to specific end-uses, Scandic Hotel Kalastajatorppa, Helsinki, Finland, 2001.

Folders en publicaties

[40] BIM, Houtbehandelingen: aandacht schenken aan de gezondheid, februari 2007. http://www.leefmilieubrussel.be/Templates/documentation/Home.aspx?langtype=2067.

[41] Centrum Hout, Gevelbekleding van massief hout, 3e druk, 2010.

[42] Dobbels F., Houtskeletbouw: een systeem in volle ontwikkeling, WTCB-Dossiers (2006) n°2, katern 6, 1-6.

[43] OAA Ontario Architects Association, Mould Control Practice Guide, online gepubliceerd.

[44] OAA Ontario Architects Association, Rain Penetration Control Practice Guide, online gepubliceerd.

[45] Passiefhuis-Platform vzw, Vademecum passieve woningen en laagenergierenovatie, 1 juli 2009, http://www.passief.be/content/seetool_media/pdf/Vademecum%20PHPP%2001072009.pdf.

[46] Vlaams Instituut voor Bio-ecologisch Bouwen en Wonen, Bewust duurzaam bouwen, 2003.

[47] Wijnants J., Dekvloeren, bewegingsvoegen of niet?, WTCB-infofiche, (11 januari 2011). http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=infofiches&pag=46&lang=nl.

[48] Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, Het platte dak. Aansluitingen en afwerking, Brussel, WTCB, Technische Voorlichting, nr 191, maart 1994.

[49] Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, Het platte dak. Opbouw, materialen, uitvoering, onderhoud, Brussel, WTCB, Technische Voorlichting, nr 215, maart 2000.

[50] Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, Onderzoek naar mogelijke nieuwe bouwconcepten en het effect ervan op het gebruik van oppervlaktedelfstoffen, Eindrapport mei 2010.

Syllabus

[51] Janssens A., Bouwfysische aspecten van gebouwen, syllabus, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen, 2008.

[52] Van Acker J., Houttechnologie 1. Materiaalkarakteristieken, Vakgroep Land- en bosbeheer, Universiteit Gent, 2011.

[53] Vandevelde P., Brüls A., Brandveiligheid in gebouwen, Universiteit Gent, Vakgroep mechanica van stroming, warmte en verbranding, 2010.

Eindwerken en docoraatsverhandelingen

[54] Claes J., Claes K., Detaillering van passiefhuizen in traditionele houtskeletbouw, masterproef, De Nayer Instituut, departement industriële wetenschappen, Sint-Katelijne-Waver, 2008.

[55] Hasselaar B.L.H., Vernieuwbare isolatiematerialen als duurzaam alternatief, T.U.Delft, 2004.

[56] Sedlbauer K., Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components, Fraunhofer Institute for Building Physics, doctoraatsverhandeling, 2002.

[57] Verbeeck G., Optimisation of extremely low energy residential buildings, Proefschrift voorgedragen tot het betalen van het doctoraat in de ingenieurswetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven, mei 2007.

Vakliteratuur

[58] Hoffmeyer P., Hout als bouwmateriaal, Technische Houtdocumentatie (vakinformatie over het construeren in hout), n° A4/1, Deventer, Kluwer, mei 1995, 1-28.

[59] Hartl H., Gedrag van hout en plaatmaterialen bij brand, Technische Houtdocumentatie (vakinformatie over het construeren in hout) n° A13/1, Deventer, Kluwer, november 1995, 1-8.

[60] Jorissen A.J.M., Modificatiefactor vochtgehalte en belastingsduur, Technische Houtdocumentatie (vakinformatie over het construeren in hout), n° A4/2, Deventer, Kluwer, mei 1995, 1-5.

Normen, richtlijnen en technische specificaties

[61] STS 04.1 Hout en plaatmaterialen op basis van hout – Structuurhout (2008).

[62] STS 04.2 Hout en plaatmaterialen op basis van hout – Schrijnwerkhout (2008).

[63] STS 04.3 Hout en plaatmaterialen op basis van hout – Behandelingen van het hout (2009).

[64] STS 04.4 Hout en plaatmaterialen op basis van hout – Platen op basis van hout (2009).

[65] STS 52.1 Houten buitenschrijnwerk (2010).

[66] Vlaams Energieagentschap, Gevalideerde numerieke berekeningen. Ontwerptekst, Project Practical Approach for Thermal Bridges 2010, 31 december 2009.

[67] Vlaams Energieagentschap, Toelichtingsdocument. Volgens "Ontwerp tot wijziging van BIJLAGE IV/V van het EPB-besluit", Project Practical Approach for Thermal Bridges 2010, 31 december 2009.

[68] Vlaams Energieagentschap, Implementatie van bouwknopen in EPR, Project PAThB 2010 (Practical Approach for Thermal Bridges), http://www.energiesparen.be/epb/bouwknopen, 2010.

[69] Vlaams Energieagentschap, Nota: Beschermd volume, verliesoppervlakten en andere oppervlakten in het kader van energieprestatieregelgeving, EPB, september 2010.

[70] Bijlage IV – Behandeling van bouwknopen, Bijlage tot het besluit van de Vlaamse Regering van 23 juli 2010 tot wijziging van het besluit van de Vlaamse Regering van 11 maart 2005 tot vaststelling van de eisen op het vlak van de energieprestaties en het binnenklimaat van gebouwen, Belgisch Staatsblad, 21 oktober 2010.

[71] Transmissiereferentiedocument. Nadere specificaties m.b.t. de berekening van de transmissieverliezen in het kader van de energieprestatieregelgeving, versie 8 december 2010.

Websites

[72] Belgian Woodforum, (6 november 2010). http://www.woodforum.be/nl.

[73] CTIB – TCHN, (6 november 2010). http://www.ctib-tchn.be/.

[74] Energiesparen, www.energiesparen.be.

[75] Hanssens Wood, (6 november 2010). http://www.spanten.com/nl/index.asp.

[76] Hout Info Bois, (6 november 2010). http://www.houtinfobois.be/

[77] Isoproc, www.isoproc.be

[78] Isover, www.isover.be.

[79] Vlaams Instituut voor Bio-ecologisch Bouwen en Wonen, (15 november 2010). www.vibe.be.

Bouwdetails

[80] Passiefhuis-Platform vzw, www.passiefhuisplatform.be/multimedia/bouwdetails/.

[81] Sibomat woningbouw, Zulte

[82] Stad Gent, Laag-energiewoningen in houtskeletbouw, november 2010.

[83] Stad Gent, Passiefwoningen in houtskeletbouw, november 2010.

Handleidingen

[84] Handleiding BISCO versie 9.0w, Physibel, 2008.

[85] Handleiding WUFI 4 Pro, Fraunhofer IPB.

[86] Handleiding WUFI-Bio, Fraunhofer IPB.

BIJLAGE 1:

Het gedrag bij brand van hout (en constructies)

Hieronder wordt voor de volledigheid een beknopte beschrijving gegeven van het gedrag van het materiaal hout bij brand.

Bij blootstelling aan brand, ontvlamt het hout en wordt een houtskoollaagje gevormd op het oppervlak dat het onderliggend, onaangetast hout isoleert en beschermt. De brand kan zich zo maar heel langzaam voortplanten in het materiaal. De warmte die nog doorgevoerd wordt doorheen het isolerende houtskoollaagje, droogt en carboniseert het onaangetaste hout. Het carbonisatiefront vordert traag doorheen het hout, met een constante penetratiesnelheid β (mm/min.), die afhankelijk is van het vochtgehalte van het hout, de dichtheid en de oriëntatie van de blootgestelde zijde.

Voor hard hout met een massadichtheid groter dan 450kg/m^3, is de penetratiesnelheid gelijk aan 0.6mm/min. Zacht hout wordt sneller aangetast: 0.8mm/min. Voor harsachtige houtsoorten met een massadichtheid groter dan 450kg/m^3, is de penetratiesnelheid 0.7mm/min, of omgezet ongeveer 1cm per kwartier.

Door de vorming van een steeds dikker wordende houtskoollaag zonder mechanische sterkte, vermindert de sectie van het element. Daardoor neemt de totale sterkte af. De sterkte van het onaangetaste hout binnenin het element bedraagt 80 à 100% van de initiële sterkte. Hout reageert beter op vuur dan staal, want hoewel het oppervlak verkoold is, behoudt het hout binnenin bijna nog al zijn mechanische sterkte.

Houten elementen zullen ook relatief weinig vervormen bij brand, i.t.t. stalen of betonnen elementen. Het hout heeft een kleine thermische uitzettingscoëfficiënt en vóór de carbonisatie optreedt, kent het hout een relatief kleine temperatuurstijging, dus relatief kleine spanningen.

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen twee aspecten die het gedrag bij brand bepalen: de brandweerstand en de reactie bij brand.

Om de brandweerstand te verhogen, kan men het houtskelet bekleden met onbrandbare plaatmaterialen. Men vermijdt doorgaande holtes in de structuur en gebruikt een binnen- en buitenafwerking met een voldoende brandweerstand.

Behandelingen ter verbetering van de brandreactie van hout zijn gebaseerd op de procédés F1, F2 en F3, afhankelijk van de klimaatklasse (NBN ENV 1995-1-1) waarin het hout toegepast wordt: droog milieu, vochtig milieu of buitenmilieu. [62]

Er zijn verschillende technieken om het hout te behandelen:

- Schuimvormende verven/vernissen. Deze worden in één of meerdere lagen op het oppervlak aangebracht. Ze verminderen de ontvlambaarheid en de vlamuitbreiding, doordat zich bij brand een isolerende schuimlaag vormt.
- Behandeling met brandvertragende zouten onder de vorm van verf/vernis of drenking in een waterige zoutoplossing. De behandeling stelt het begin van de thermische aanval uit.
- Behandeling in de massa met brandvertragende zouten. Dit is de meest doeltreffende behandeling.

<u>Houten structuren</u>

De gevraagde brandweerstand (Rf), vermenigvuldigd met de penetratiesnelheid, levert de verkregen doorsnedevermindering na Rf min. op. Voor een doorsnede van massief hout kan een brandweerstand van Rf ½h gehaald worden, voor een doorsnede uit GGH, Rf 1h.

Voor het beschermen van de houten constructie-elementen kan men op twee manieren werken:

- Het hout impregneren met brandwerende zouten. Zo verbetert de reactie bij brand, maar de invloed op de penetratiesnelheid is niet zo groot, en op de carbonisatiesnelheid is er zelfs geen invloed.
- Het hout beschermen met dunne isolerende lagen of met houten panelen. De eerste manier krijgt de voorkeur.

De meest economische manier is echter het verhogen van de houten sectie van het element.

Volgens Eurocode 5 kan men de effectieve doorsnede van het hout na een blootstellingstijd t, verkrijgen door de initiële dwarssectie te verminderen met de conventionele carbonisatiediepte d_{ef}, gelijk aan de penetratiesnelheid β_t vermeerderd met 7mm.

BIJLAGE 2: Gedetailleerde berekening ψ-waardes

		$\psi_{e,\ hout}$ W/mK	$\psi_{e,\ isolatie}$ W/mK	$\psi_{e,\ totaal}$ W/mK	$\psi_{e,\ lim}$ W/mK	$\psi_{e,\ lim,\ php}$ W/mK		Q W/m	Q_{hout} W/m	$Q_{isolatie}$ W/m
SCHRIJNWERK		0,085	0,11	0,1065625	0,1		NIET OK			
				0,334	0,1		NIET OK			
				0,124		0,01	NIET OK			
FUNDERING	sim.1			-0,0516606	0,05		OK	24,1209875	30,149	23,16
	sim.2							19,717	19,717	19,717
	sim.1			-0,02375	0,05		OK	24,063		
	sim.2							18,682		
	sim.1			-0,02375		0,01	OK	24,063		
	sim.2							18,682		
PLAT DAK		-0,163	-0,048	-0,0638125	0		OK			
				-0,066	0		OK			
				-0,043		0,01	OK			
HELLEND DAK				-0,0215459	0		OK	14,5016	29,24	12,152
				-0,0567596	0		OK	14,278		
				-0,0729848		0,01	OK	14,278		

LEGENDE

BIJLAGE 2: Gedetailleerde berekening ψ-waardes

oppervlaktegewogen ψ-waarde
ψ-waarde op basis van oppervlaktegewogen λ-waardes
ψ-waarde op basis van oppervlaktegewogen λ-waardes, volgens PhP
waarde rechtstreeks uit Bisco

	constructie	leidingspouw	opp.gewogen
Houtfractie	0,15	0,125	0,1375
Isolatiefractie	0,85	0,875	0,8625

GEBRUIKTE FORMULES

FUNDERING

ΔT		20		
H_{muur}		1,6		
$U_{muur, hout}$	0,414		U_{muur}	0,1699125
$U_{muur, isolatie}$	0,131			
			U_{muur}	0,183

$\psi=Q_1/(\Delta T)-Q_2/(\Delta T)-H_{muur}*U_{muur}$

HELLEND DAK

$U_{1, hout}$	0,418	U_1	0,171325
$U_{1, isolatie}$	0,132		
l_1	1,426		
		$U_{1, opp.gewogen}$	0,184

$\psi=Q/(T_i-T_e)-U_1*l_1-U_2*l_2$

$R_{tot}=1/\alpha_e+L/\lambda+1/\alpha_i$

α_e	25
α_i	7,7

BIJLAGE 2: Gedetailleerde berekening ψ-waardes

l_1 1,426

$U_{1,\ opp.gewogen}$ 0,184

l_1 1,51

materiaal	d	λ	R
duragyp	0,0125	0,21	0,05952381
luchtlaag	0,025	0,367	0,06811989
isolatie	0,22	0,04	5,5
menuiserite	0,003	0,18	0,01666667
		$R_{tot,isolatie}$	5,8141805

materiaal	d	λ	R
duragyp	0,0125	0,21	0,05952381
luchtlaag	0,025	0,367	0,068119891
hout	0,22	0,15	1,466666667
menuiserite	0,003	0,18	0,016666667
		$R_{tot,hout}$	1,780847164

$U_{2,\ hout}$ 0,561531

$U_{2,\ isolatie}$ 0,171993

U_2 0,22555465

l_2 0,85

materiaal	d	λ	R
duragyp	0,0125	0,21	0,05952381
luchtlaag	0,025		0,16
isolatie/hout	0,22	0,0565	3,89380531
menuiserite	0,003	0,18	0,01666667
		$R_{tot,\ opp.gewogen}$	4,29986592

$U_{2,\ opp.gewogen}$ 0,23256539

l_2 0,85

materiaal	d	λ	R
duragyp	0,0125	0,21	0,05952381
luchtlaag	0,025		0,16
isolatie/hout	0,22	0,0565	3,89380531

BIJLAGE 2: Gedetailleerde berekening ψ-waardes

$R_{tot,\ opp.gewogen}$ 4,28319925

$U_{2,\ opp.gewogen,}$ 0,23347034

l_2 0,85

materiaal	d	λ	R
duragyp	0,0125	0,21	0,05952381
luchtlaag	0,049		0,18
isolatie/hout			4,8785
		$R_{tot,\ opp.gewogen}$	5,28789394

$U_{3,\ opp.gewogen}$ 0,18911121

l_3 0,68

materiaal	d	λ	R
isolatie/hout			4,8785
OSB 3	0,018	0,13	0,13846154
		$R_{tot,\ opp.gewogen}$	5,18683167

$U_{4,\ opp.gewogen}$ 0,19279592

l_4 0,944

RELATIEVE FOUT VAN DE RESULTATEN

schrijnwerk	0,680950599
fundering	1,175184211
plat dak	0,033143939
hellend dak	0,620400904
gemiddeld	0,627419913

BIJLAGE 2: Gedetailleerde berekening ψ-waardes

AANBEVELINGEN

	$\psi_{e,\ hout}$ W/mK	$\psi_{e,\ isolatie}$ W/mK	$\psi_{e,\ totaal}$ W/mK	$\psi_{e,\ lim}$ W/mK	$\psi_{e,\ lim,\ php}$ W/mK		Q W/m	Q_{hout} W/m	$Q_{isolatie}$ W/m
SCHRIJNWERK			0,089	0,1		OK			
FUNDERING									
sim.1			-0,03635	0,05		OK	23,653		
sim.2							18,524		
HELLEND DAK			-0,02915	0		OK	14,394		

BIJLAGE 2: Gedetailleerde berekening ψ-waardes

materiaal	d	λ	R
duragyp	0,0125	0,21	0,059524
luchtlaag	0,025		0,16
isolatie/ho	0,22	0,0565	3,893805
houtvezelp	0,022	0,04	0,55
		$R_{tot,\ opp.gewo}$	4,833199

$U_{2,\ opp.gewog}$ 0,206902

l_2 0,85

BIJLAGE 3:

Zijn de typedetails EPB-aanvaard?

De drie basisregels zijn gebaseerd op het principe van de continuïteit van de thermische isolatie. De isolatielaag bestaat in het geval van houtskeletbouw uit meerdere, eventueel heterogene lagen. De bouwlagen sluiten op elkaar aan, en hebben elk afzonderlijk een warmtegeleidbaarheid λ kleiner dan of gelijk aan 0,2 W/mK. Aangezien er geen luchtlaag tussen de verschillende lagen mag zitten, beschouwen we hier de samengestelde bouwlaag met de volgende opbouw: houtwolplaat, houten balk/minerale wol, durélisplaat, houten balk/minerale wol. De warmteweerstand van deze samengestelde laag is 5 m^2K/W.

In een verticale snede mag de heterogene laag minerale wol/houten stijl vereenvoudigd worden tot een bouwlaag met een dikte d en een oppervlaktegewogen warmtegeleidingscoëfficiënt λ van 0,0534 en 0,05139 W/mK respectievelijk ter plaatse van de constructie en de leidingspouw.

Volgens 'Bijlage VIII: Behandeling van bouwknopen' [70], voorgeschreven door het Belgisch ministerie, bestaat het typedetail van het hellend dak uit twee bouwknopen. De afstand in het dakvlak waarover zich geen isolatie bevindt, is ongeveer 70 cm, d.i. meer dan de maximale 40 cm om te kunnen spreken van één lineaire bouwknoop. Bijgevolg wordt de ψ-waarde berekend met inachtname van de U-waarde en afstand van de horizontale en verticale isolatiestrook die respectievelijk de dakvloer en de zolderruimte afbakenen.

Basisregel 1 bepaalt de minimale contactlengte tussen de isolatielagen van de samenkomende scheidingsconstructies.

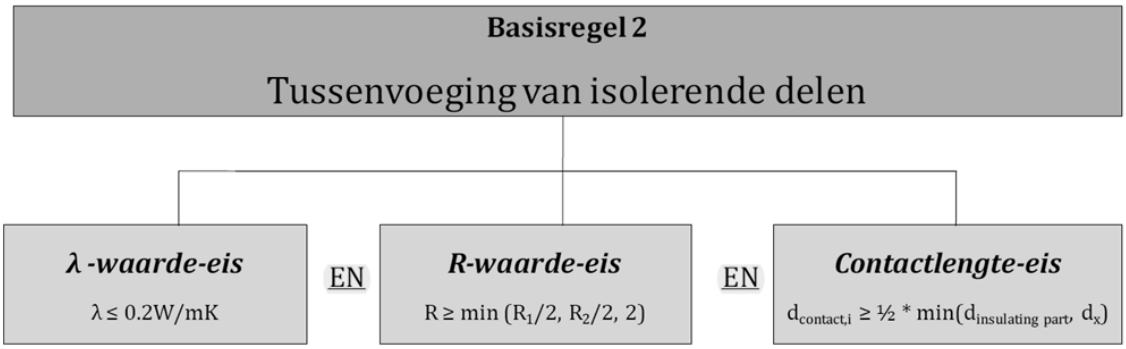
$$d_{contact} \geq {}^{1}/_{2} * \min(d_1, d_2) \qquad (1)$$

Met $d_{contact}$ de contactlengte van de isolatielagen gemeten tussen koude en warme zijde;

d_1 en d_2 de respectievelijke diktes van de isolatielagen van de 2 samenkomende scheidingsconstructies.

- Schrijnwerk: basisregel 1 is enkel van toepassing op bouwknopen waarbij de isolatie van de twee samenkomende scheidingsconstructies, direct op elkaar aansluiten. Dit is hier niet het geval.
- Plat dak: niet van toepassing.
- Hellend dak: niet van toepassing.
- Funderingsaansluiting: niet van toepassing

Basisregel 2 is van toepassing op bouwknopen waarbij de isolatielagen niet rechtstreeks op elkaar (kunnen) aansluiten, maar waar er een isolerend deel kan tussengevoegd worden, zodat de thermische snede nog steeds gegarandeerd is. De regel geeft aan dat de bouwknopen tegelijk aan de volgende drie voorwaarden moeten voldoen om een EPB-aanvaarde bouwknoop te zijn.



Figuur 4.11 Basisregel 2: elk van de tussengevoegde isolerende delen moet voldoend aan elk van de 3 eisen.

Fig 1 Basisregel 2: elk van de tussengevoegde isolerende delen moet voldoen aan elk van de drie eisen. [67]

- Schrijnwerk:
  - λ-waarde-eis: De tussengevoegde delen gespoten PU-schuim en de meranti multiplex moeten elk een warmtegeleidingscoëfficiënt hebben kleiner dan of gelijk aan 0,2 W/mK. Met een respectievelijke λ-waarde van 0,055 en 0,13 W/mK wordt aan deze regel voldaan.
  - R-waarde-eis: Voor raamprofielen is de R-waarde-eis iets minder streng: $R \geq \min\left(\frac{R_1}{2}, 1.5\right)$ met R_1 de warmteweerstand van de isolatielaag van de opake scheidingsconstructie (in dit geval dus de hiervoor reeds vermelde samengestelde laag), en R de warmteweerstand van een isolerend deel. De warmteweerstand R van de samengestelde laag is 5 m^2K/W. De warmteweerstand van elk van de tussengevoegde isolerende delen moet dus groter dan of gelijk zijn aan 1,5 W/m^2K. Op de gespoten PUR past men voor de bepaling van de warmteweerstand een correctieterm toe [71]. De warmteweerstand is in dit geval gelijk aan 0,15 m^2K/W. De warmteweerstanden van beide lagen meranti multiplex volstaan echter ook niet (0,12 en 0,09 m^2K/W). Deze bouwknoop kan dus al niet voldoen aan basisregel 2.
  - Contactlengte-eis: De derde eis van basisregel 2 stelt dat de contactlengte tussen een isolerend deel en een isolatielaag of een ander isolerend deel, groter dan of gelijk aan het minimum van de helft van de dikte van het isolerend deel, en de helft van de dikte van hetzij een ander aansluitend isolerend deel, of een aansluitende isolatielaag, moet zijn: $d_{contact,i} \geq \min\left(\frac{d_{isolerend\ deel}}{2}, \frac{d_x}{2}\right)$, met dx de dikte van hetzij het aansluitend isolerend

deel, hetzij de dikte van de aansluitende isolatielaag. De bouwknoop voldoet aan deze regel.
  - We kunnen dus besluiten dat de bouwknoop schrijnwerk niet voldoet aan de tweede basisregel.

- Plat dak:
  - λ-waarde-eis: Bij het platte dak is het tussengevoegde isolerende deel, de randisolatie. Deze heeft een λ-waarde van 0,040 W/mK. Aldus is voldaan aan deze eis.
  - R-waarde-eis: Deze eis stelt dat de warmteweerstand R van elke isolerend deel - in dit geval van de randisolatie - niet kleiner mag zijn dan de helft van het kleinste van R_1 en R_2, of 2 (om rekening te houden met erg dikke isolatiepakketten). $R \geq \min\left(\frac{R_1}{2}, \frac{R_2}{2}, 2\right)$. De samengestelde warmteweerstand R_1 van het plat dak, is gelijk aan 6,06 m^2K/W . De samengestelde warmteweerstand R_2 van de wand, is 5 m^2K/W. Aldus moet de warmteweerstand van de randisolatie groter zijn dan of gelijk aan 2 m^2K/W. De bouwknoop voldoet aan deze eis, met een warmteweerstand R van 5,5 m^2K/W.
  - Contactlengte-eis: De bouwknoop voldoet aan deze regel.
  - We kunnen dus besluiten dat de bouwknoop plat dak voldoet aan de tweede basisregel.

- Hellend dak:
  - λ-waarde-eis: De warmtegeleidbaarheid van het tussengevoegd isolerend deel - de randisolatie - is gelijk aan 0,040 W/mK, en aldus kleiner dan 0,2 W/mK. Het detail voldoet.
  - R-waarde-eis: Met een warmteweerstand van 5,5 m^2K/W voor de randisolatie voldoet het detail.
  - Contactlengte-eis: Het typedetail voldoet.
  - We kunnen dus besluiten dat het typedetail voldoet.

- Funderingsaansluiting:
  - λ-waarde-eis: De isolatielaag van een scheidingsconstructie is de bouwlaag met de grootste warmteweerstand. In betreffend typedetail is dat de EPS-laag die zich onder de gewapende betonplaat bevindt. Aangezien deze isolatielaag niet rechtstreeks aansluit op de samengestelde isolatielaag van de houtskeletwand, hebben we te maken met tussengevoegde isolerende delen. Deze voldoen echter niet aan de λ-waarde-eis van 0,2 W/mK. Over thermisch isolerende delen kan men dus niet echt spreken, aangezien de tussenliggende bouwlagen die thermisch isolerende functie niet opnemen.
  - R-waarde-eis: Het typedetail voldoet niet.
  - Contactlengte-eis: Het typedetail voldoet niet.

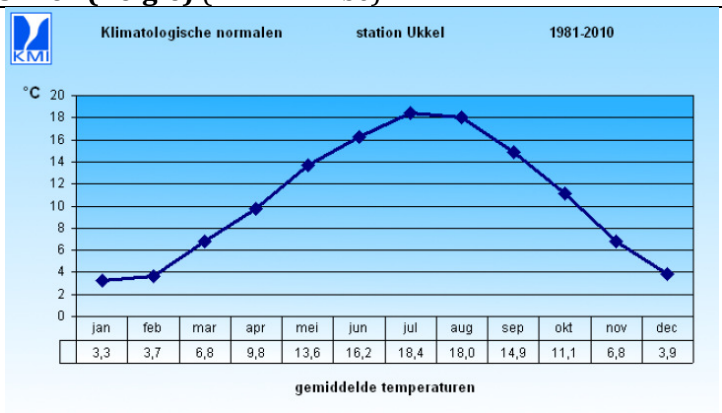
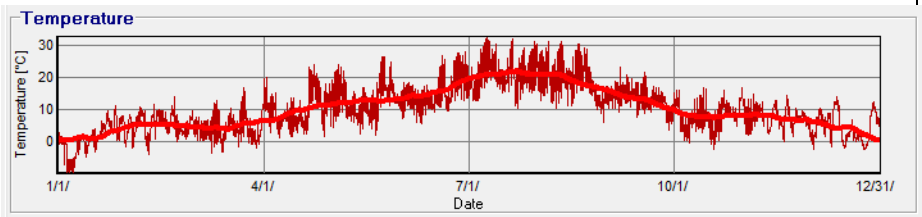
- Het typedetail voldoet niet aan basisregel 2.

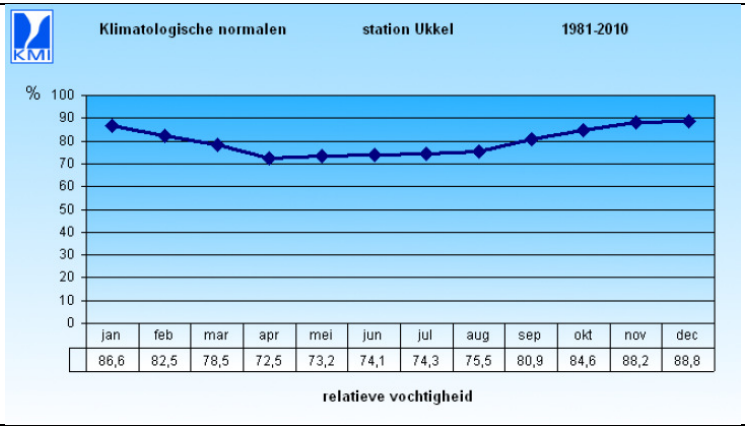
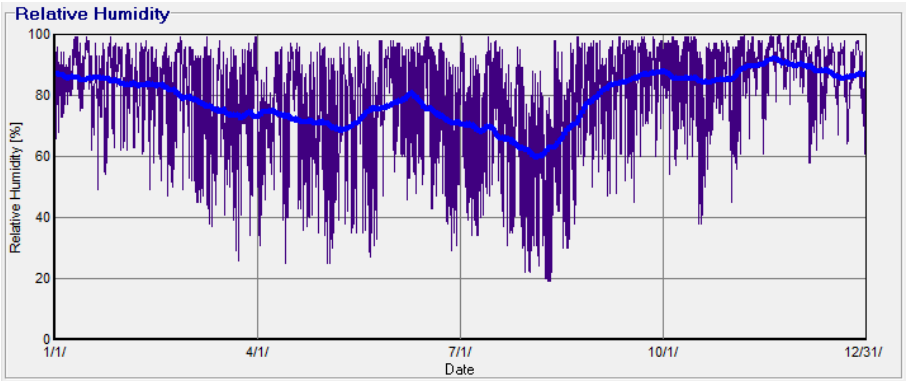
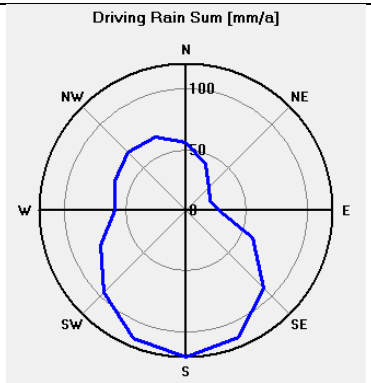
Basisregel 3 is enkel van toepassing op bouwknopen waarbij de isolatielagen niet op elkaar aansluiten, en waarvan de thermische snede niet verzekerd kan worden. Dan moet de bouwknoop voldoen aan volgende eis: $l_i \geq 1\ meter$ met l_i de weg van de minste weerstand. Hierbij mag het kortste traject tussen binnen- en buitenomgeving geen isolatielaag of isolerend deel doorkruisen met een warmteweerstand groter dan of gelijk aan het minimum van de warmteweerstanden van de scheidingsconstructies.

- Schrijnwerk: De eis is hier niet van toepassing, aangezien de weg van de minste weerstand niet naar de buitenomgeving kan zonder een isolatielaag of isolerend deel te snijden.
- Plat dak: Niet van toepassing
- Hellend dak: Niet van toepassing
- Funderingsaansluiting: Aangezien de isolatielagen van wandopbouw (samengestelde isolatielaag) en vloeropbouw (de EPS-isolatie) niet rechtstreeks op mekaar aansluiten, en de thermische snede ook niet gegarandeerd kan worden door tussenvoeging van isolerende delen, is de eis hier van toepassing. Het typedetail voldoet niet aan de eis. Om de weg van de minste weerstand langer te maken, kan men randisolatie in de spouw voorzien, en randisolatie langs de funderingszool en het ondergronds metselwerk. Indien men de opbouw van de vloer zou veranderen, en de isolatielaag bovenop de betonplaat zou plaatsen, zou deze eis hier niet meer geldig zijn, maar zou het typedetail wel kunnen voldoen aan de andere eisen.

BIJLAGE 4:

Vergelijking tussen het Belgische klimaat (Ukkel) en het klimaat in Kassel (Duitsland).

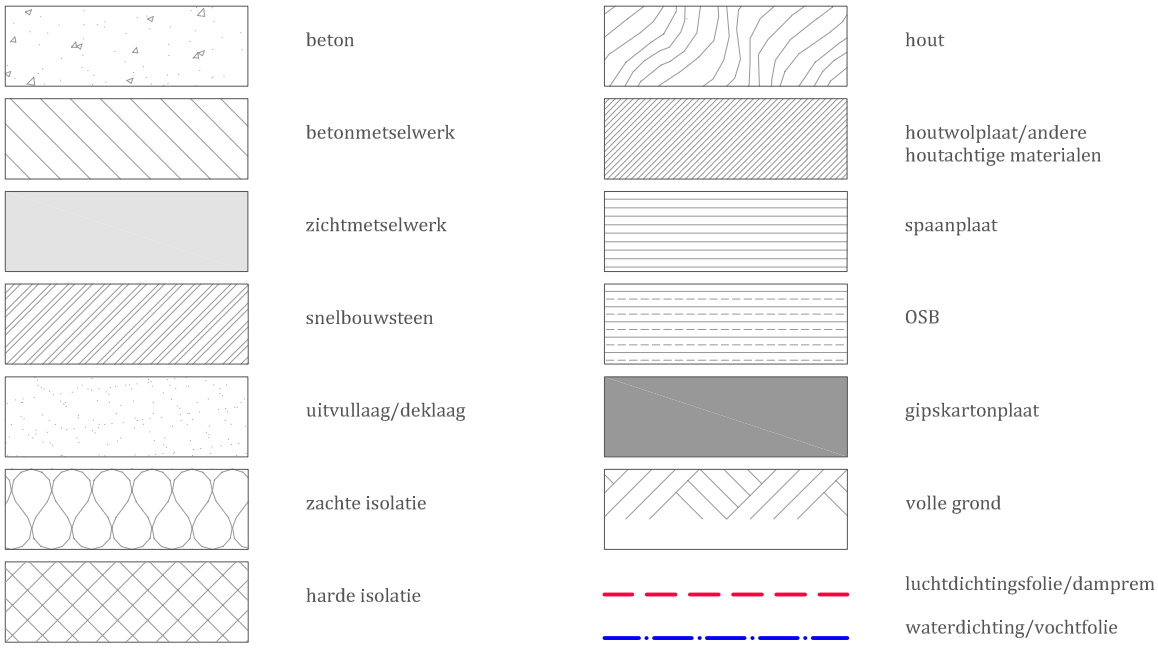
Parameter	**Ukkel (België)** (www.kmi.be)	**Kassel (Duitsland)** (WUFI)
Temperatuur		
Gemiddelde temperatuur	10,5 °C	10,1 °C
Maximale temperatuur	32,4 °C	32,8 °C
Minimale temperatuur	-8,4 °C	-10 °C

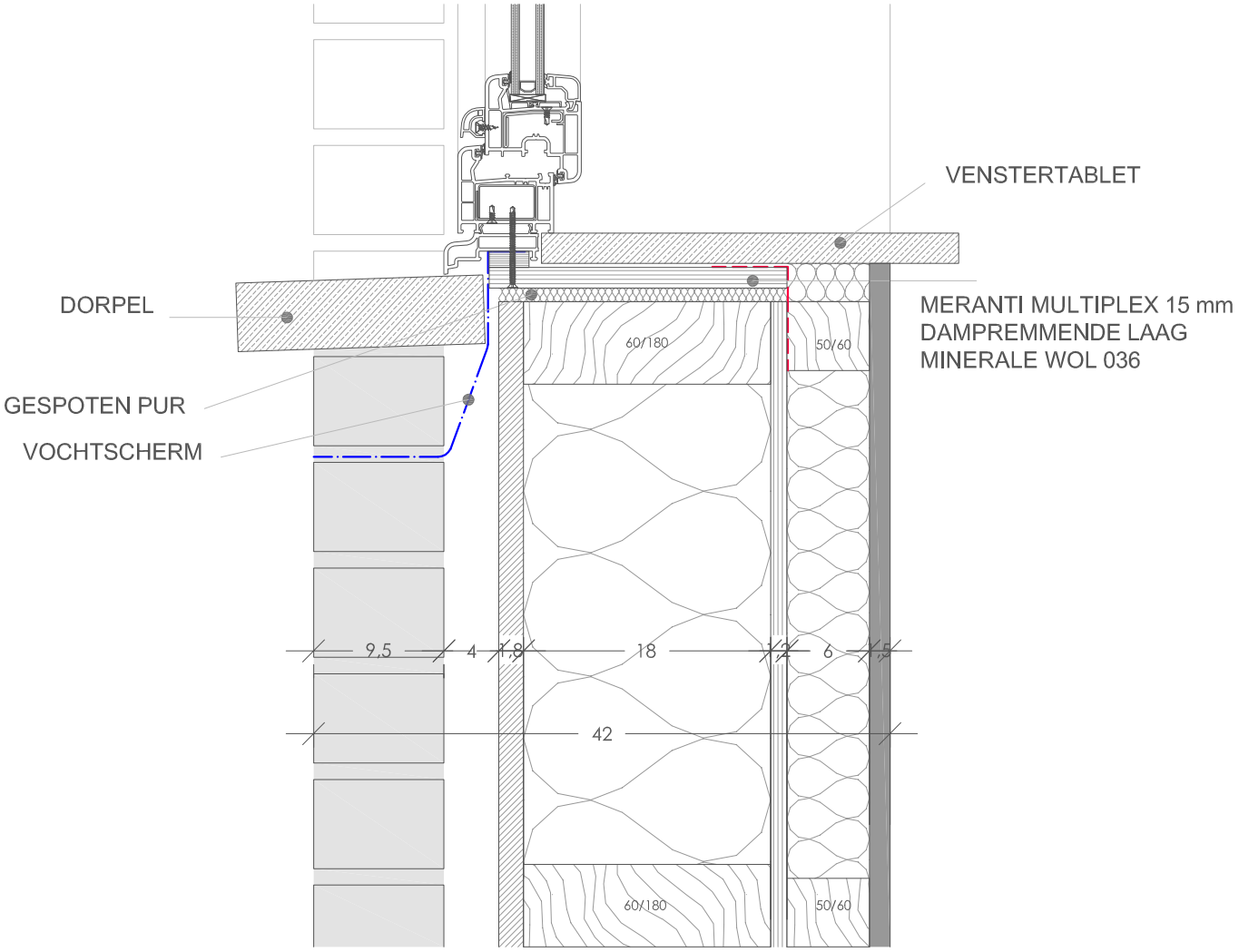
RV		
Gemiddelde RV	80%	79%
Slagregen	In België komt de wind overwegend uit het Zuid-Westen. Dit zijn de regenbrengende winden.	
Neerslagtotaal	852,4 mm	767 mm
Gemiddelde zonnestraling	985 kWh/m²	1009 kWh/m²

BIJLAGE 5: TYPEDETAILS

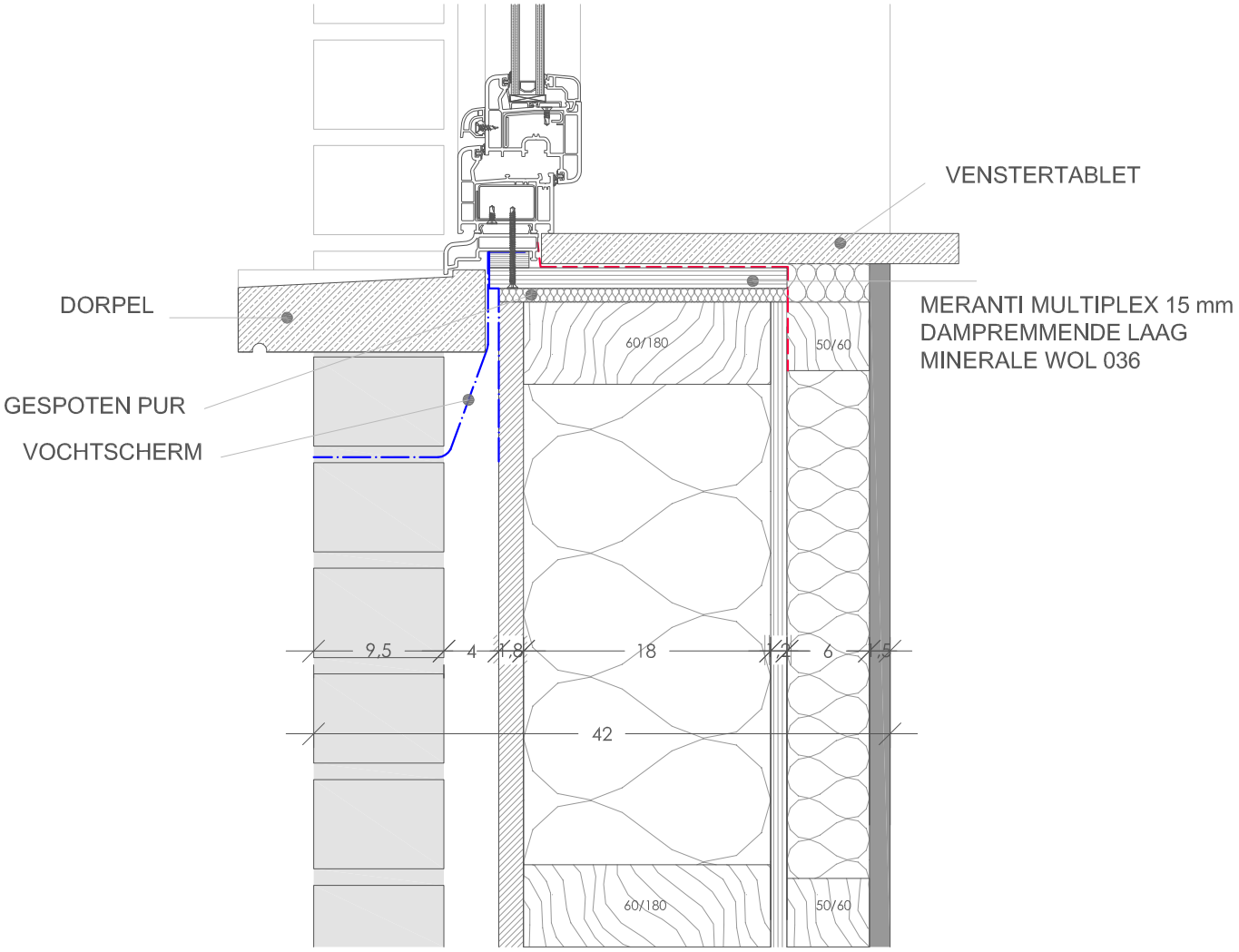
1. DORPELAANSLUITING RAAM: origineel + aangepast typedetail
2. FUNDERINGSAANSLUITING: origineel + aangepast typedetail
3. PLAT DAK: origineel + 2 aangepaste typedetails
4. HELLEND DAK: origineel + 2 aangepaste typedetails

LEGENDE



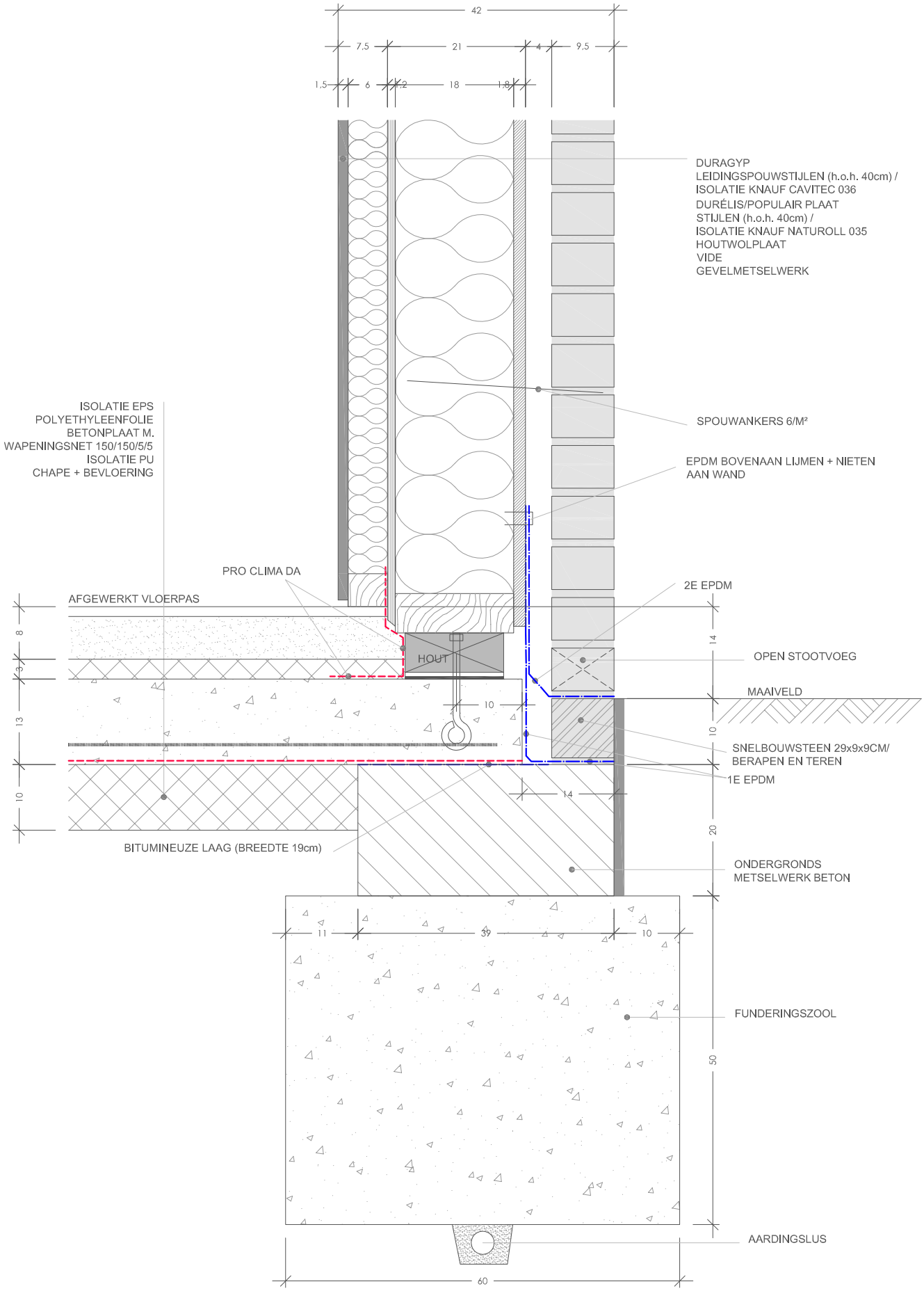


Schaal 1:5
Legende: zie voorblad



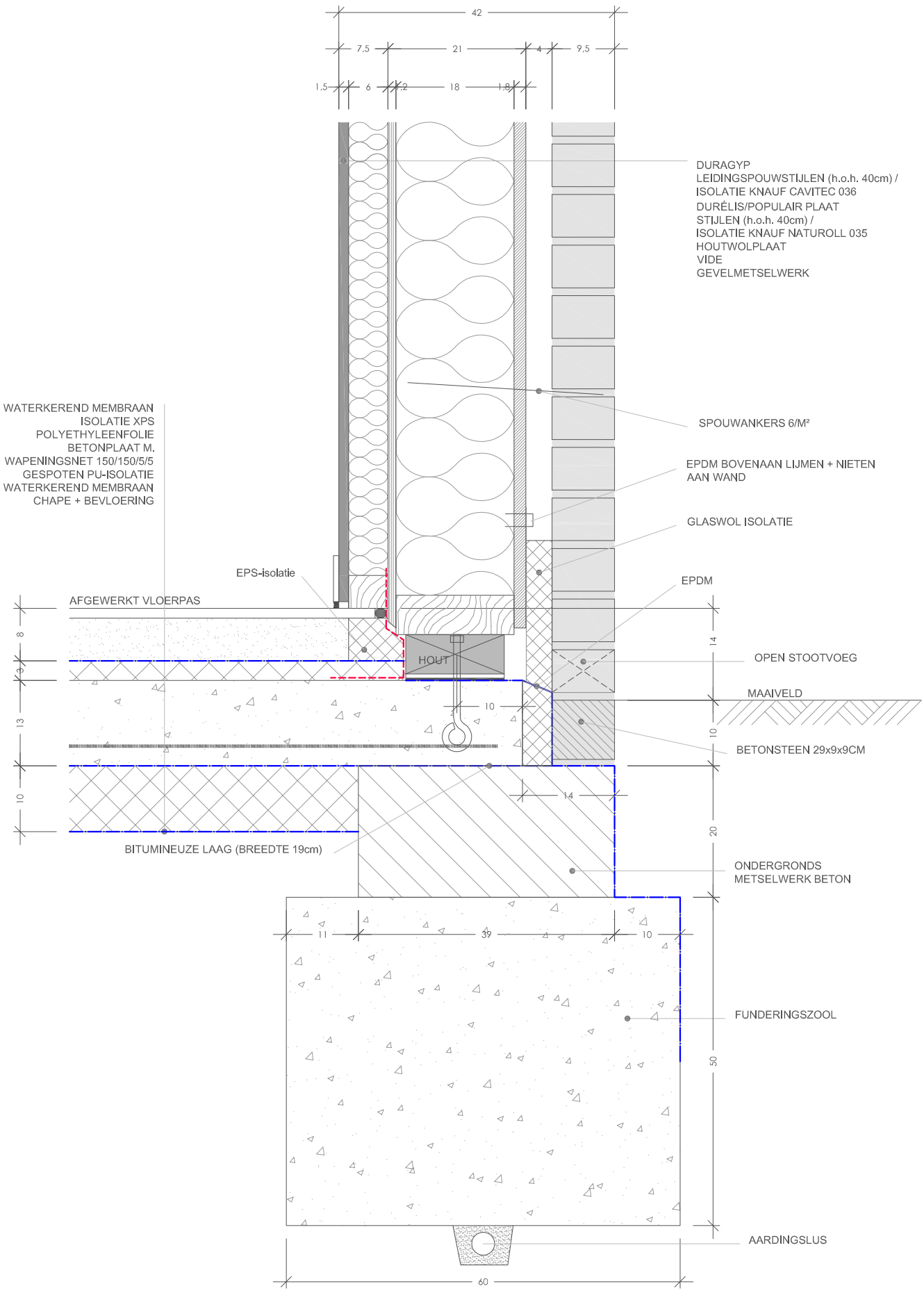
Schaal 1:5
Legende: zie voorblad

FUNDERINGSAANSLUITING VLOER OP VOLLE GROND - ORIGINEEL

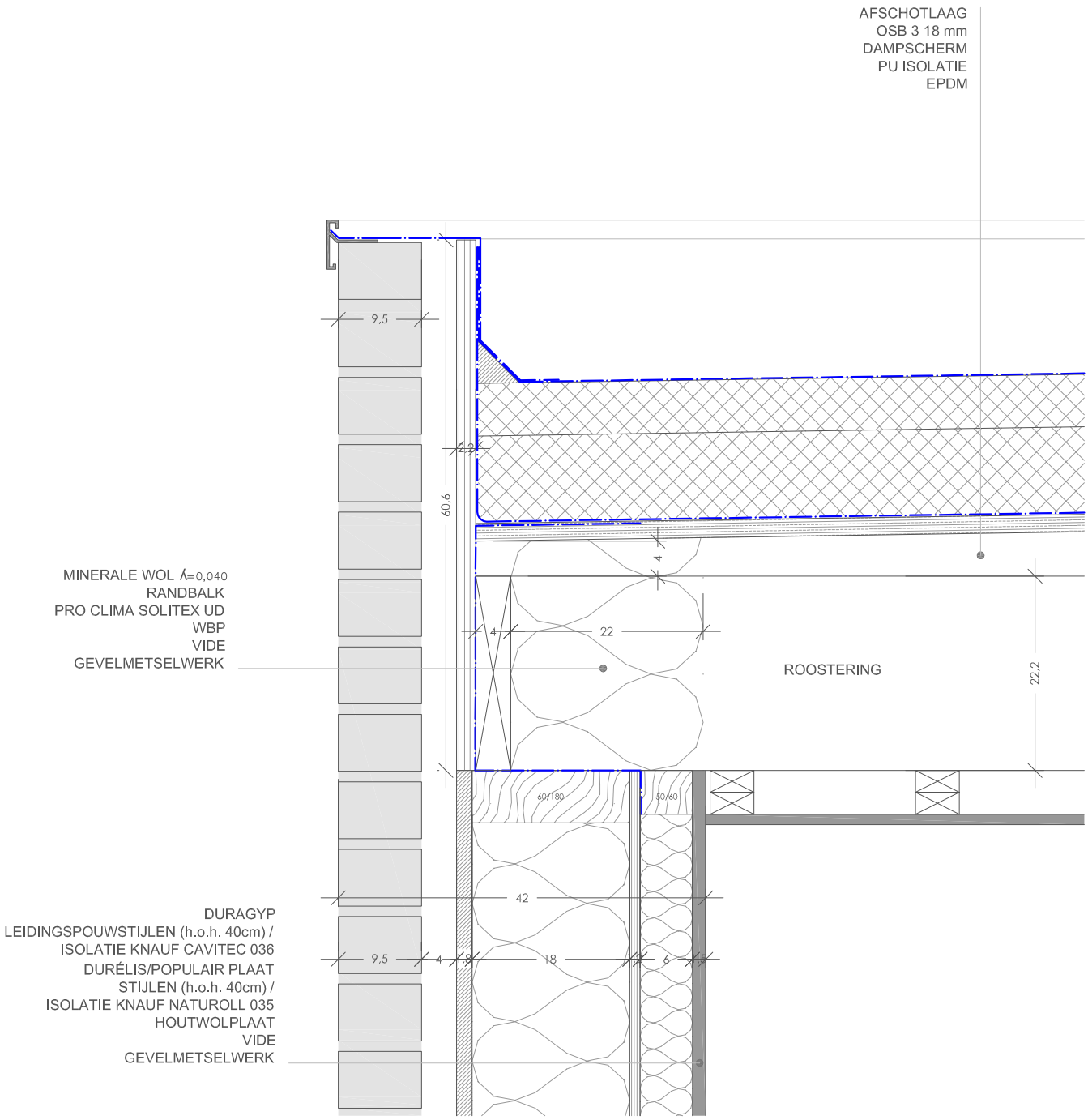


Schaal 1:8
Legende: zie voorblad

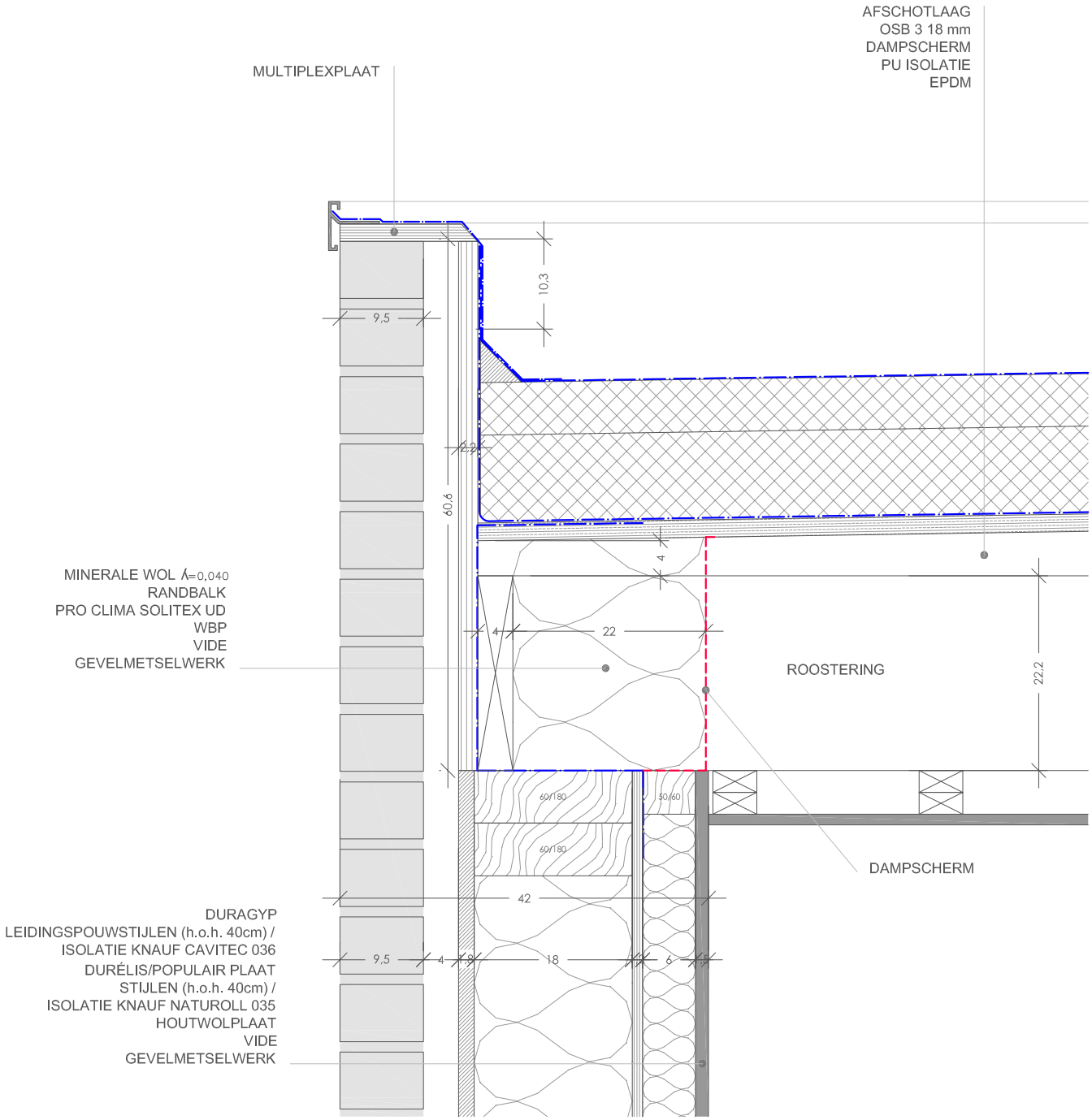
FUNDERINGSAANSLUITING VLOER OP VOLLE GROND - AANGEPAST



Schaal 1:8
Legende: zie voorblad

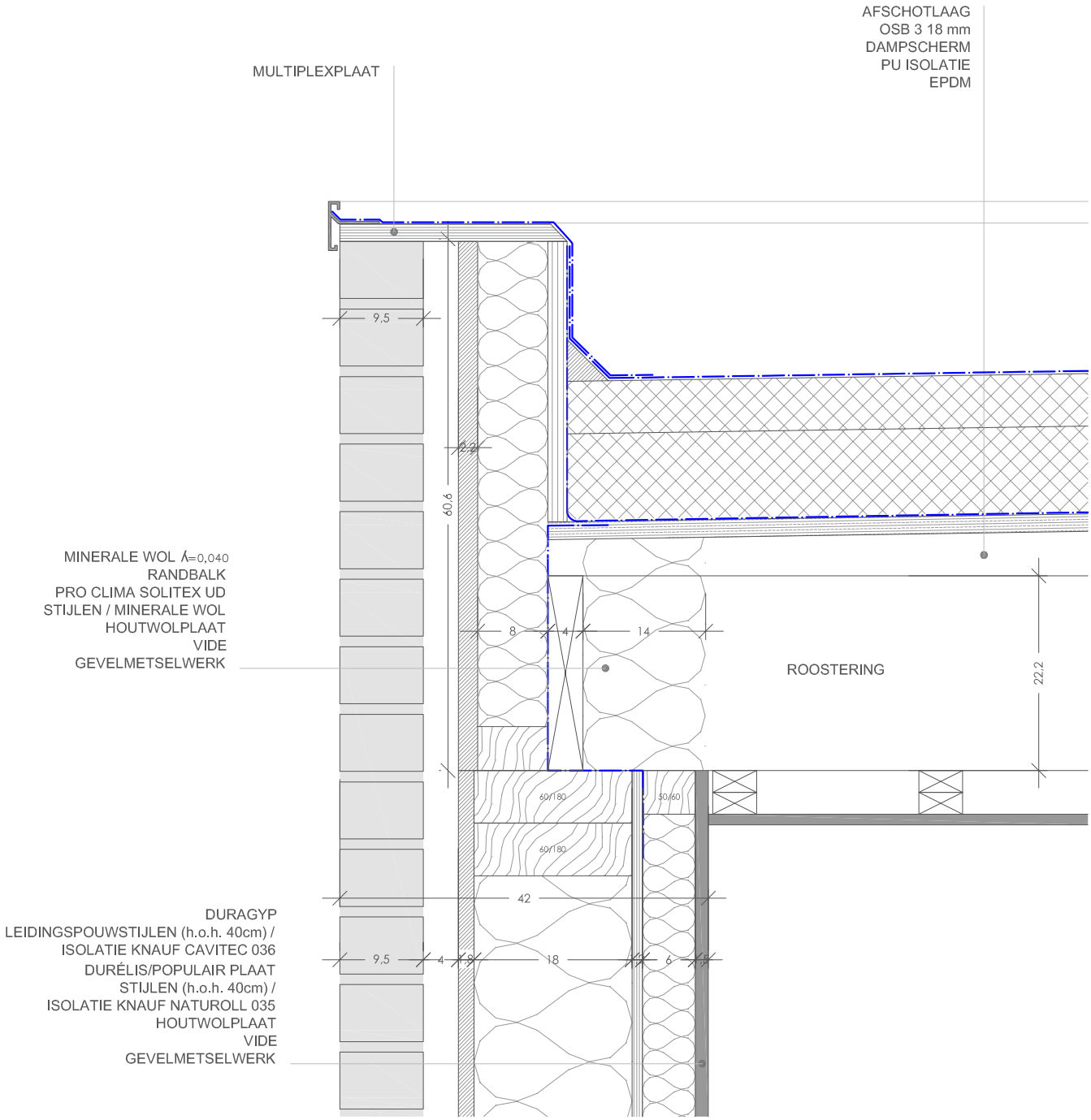


Schaal 1:7
Legende: zie voorblad



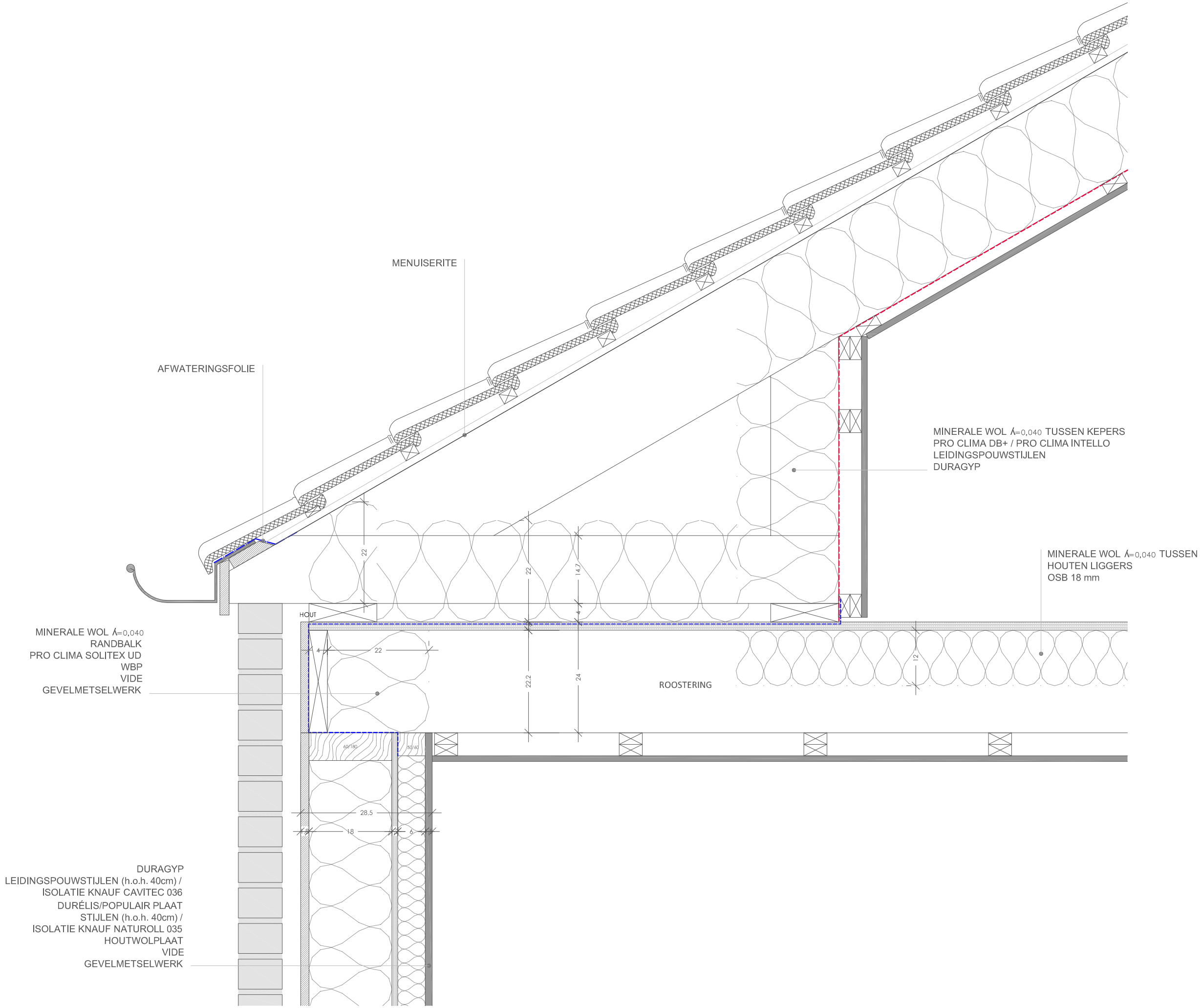
Schaal 1:7
Legende: zie voorblad

PLAT DAK - AANGEPAST 2



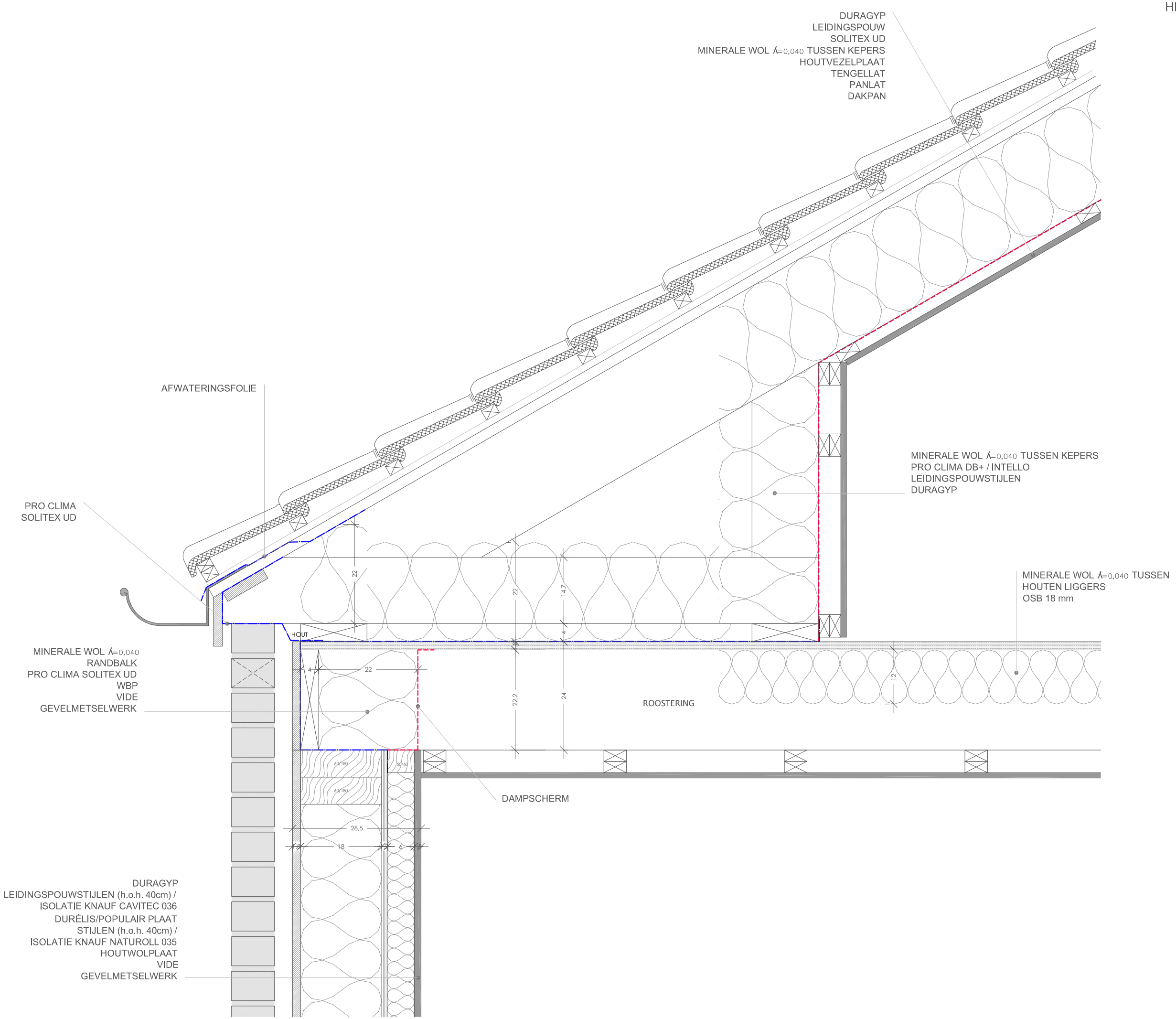
Schaal 1:7
Legende: zie voorblad

HELLEND DAK - ORIGINEEL



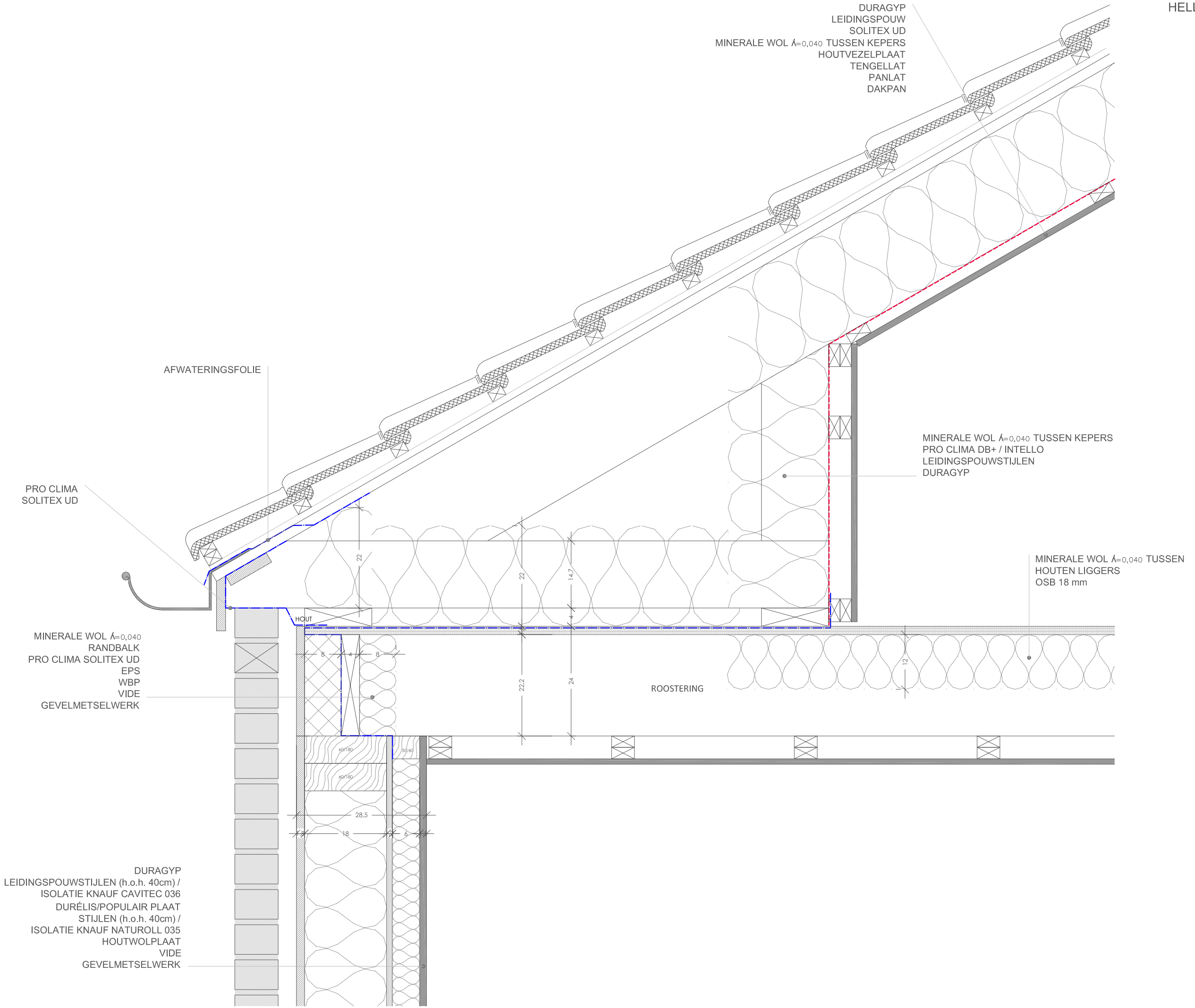
Schaal 1:8
Legende: zie voorblad

HELLEND DAK - ORIGINEEL



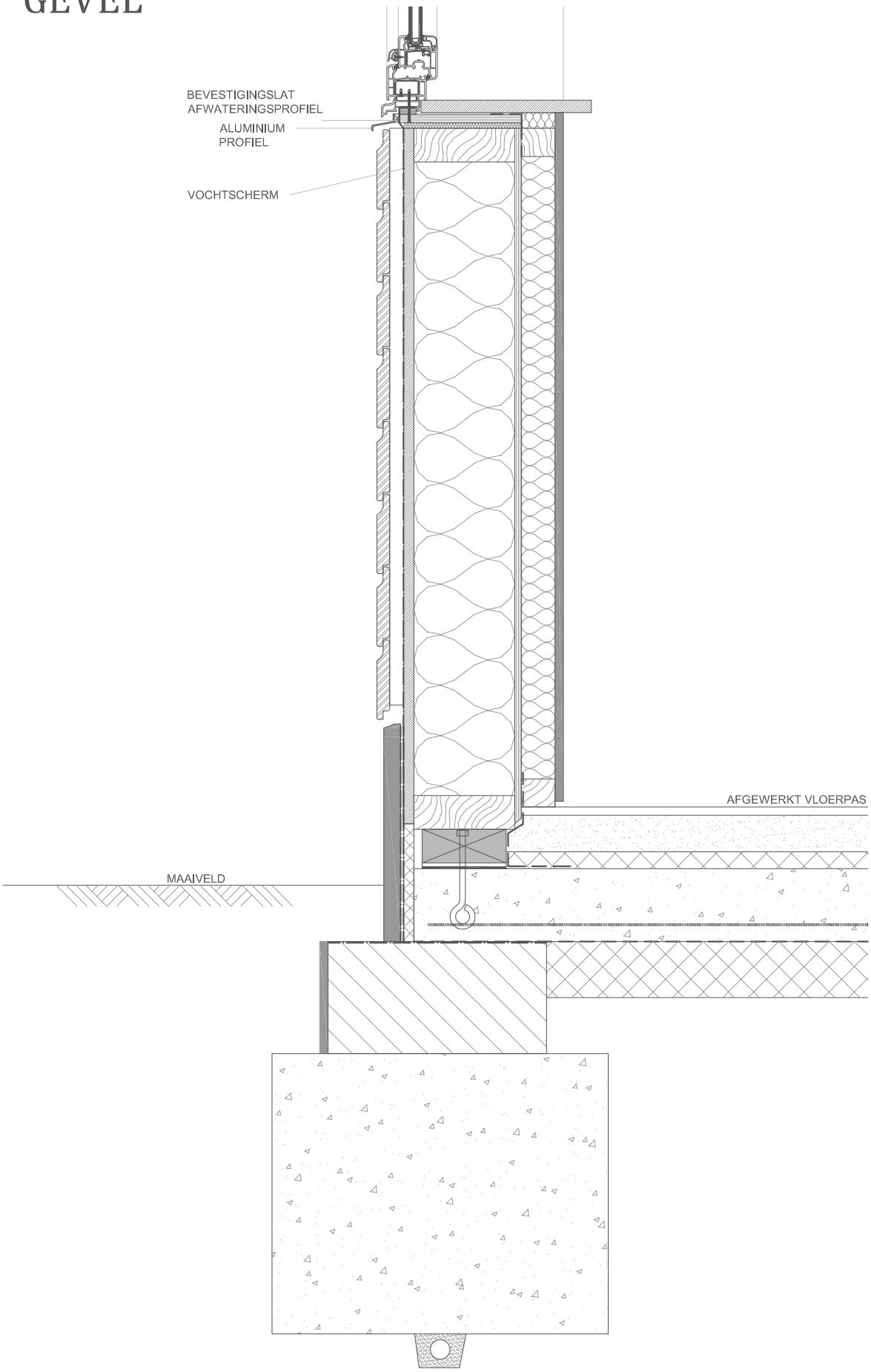
Schaal 1:8
Legende: zie voorblad

HELLEND DAK - ORIGINEEL



Schaal 1:8
Legende: zie voorblad

BIJLAGE 6: GEVEL



Schaal 1:10