

Aarde en planten in de bouw

Een evaluatie van de inzetbaarheid van
[vernaculaire] aardebouwtechnieken
in wandopbouwen van de toekomst

Gust Mannaerts

Masterscriptie Burgerlijk Ingenieur – Architect 2022

Aarde en planten in de bouw: een evaluatie van de inzetbaarheid van vernaculaire aardebouwtechnieken in wandopbouwen van de toekomst

Gust Mannaerts

Studentennummer: 01700509

Promotoren: prof. Jan Moens, dr. ir.-arch. Lionel Devlieger (Rotor asbl-vzw)

Begeleider: Raf De Preter

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

Academiejaar 2021-2022

Bedankt...

- ... aan de mensen die helemaal niets met deze scriptie te maken hebben gehad maar des te meer met de rest van wat ik uitsteek. Bedankt, mama, papa en Ward.
- ... aan zij die al iets meer met deze scriptie te maken hebben. Bedankt aan mijn medestudenten, die als enigen weten hoe het voelt om op dit punt te staan, en met wie ik in toenemende mate een fantastische tijd heb beleefd.
- ... aan de mensen die met hun hulp en informatie deze scriptie inhoud en richting hebben gegeven. In min of meer chronologische volgorde: Johan Lagae, Rik Vanmoerkerke, Marijke Steenman, Katrien Devos, Jona Van Steenkiste, Lisa Wastiels, Hilde Vanwildemeersch, Marie-Laure Pacquet, Wolf Jordan, Marc Swolfs, Geert De Jonghe en Stijn Pieters.
- ... aan de mensen voor wie het vorige in het bijzonder geldt, door me toe te laten hun woning te gebruiken als casestudie en mijn vragen te beantwoorden. Bedankt aan Sven Bullaert, Victor Everaerts, Frank Maes en Carla Verhulst, en Luc Deschepper en Inge Van de Weghe.
- ... ook aan mijn promotoren die ik – dat schreef Umberto Eco – eigenlijk niet hoor te bedanken. Ik doe het toch. Bedankt aan Lionel en Jan voor hun begeleiding en input, die verder ging dan enkel over deze scriptie.

"De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de bepalingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef."

Gust Mannaerts, 18 augustus 2022

Abstract

The energy demand and energy-related CO₂ emissions related to building materials worldwide are vast contributors to the environmental challenges the world faces today. One way of limiting the environmental impact of buildings of the future, is by adopting knowledge from past vernacular construction, which was inherently environmentally friendly. Today, the use of so-called pre-industrial construction materials is on the rise again. By taking into account both notions of sustainability and durability, this master thesis evaluates the real potential of pre-industrial building techniques, based on geo- and biomaterials, for the design and realisation of contemporary outer wall constructions in North-Western Europe.

The thesis adopts a twofold structure. The first part consists of an historical analysis of five of the most frequently adopted vernacular earth construction techniques, based on a literature study. This way, an image of the economy and ecology behind certain forms of vernacular earth construction is presented, in order to understand similarities and differences with the contemporary context. In the second part, four specific cases of modern day geo- and biobased outer walls are discussed and compared to one another as well as to a conventional reference wall. The durability assessment is done by a verification of thermal insulation properties. The sustainability assessment is done by means of an embodied carbon [EC] calculation. In order to do this, qualitative research is first carried out: the wall compositions and building methods are documented, and the same is done for the used materials and their corresponding production processes. The actual quantitative calculation relies mainly on the use of the Totem tool.

The literature study showcased how vernacular earth construction was characterised, in terms of material sourcing and labour, by a far-reaching dependency on the immediate environment. Subsequently, production and transport through infrastructure networks got mechanised and less and less reliant on human and animal labour. The environmental impact of these walls was low. Both resource excavation, material production, construction and maintenance were processes that included an almost negligible Embodied Carbon value. The qualitative analysis of the modern geo- and biobased walls presents a vastly different image. The identification of present-day material accounts clarifies how the North-Western European building sector is now a complex and specialised industry in all its facets, from production until demolition. Though it is based on the use of pre-modern materials, this also applies to eco- construction, which translates into a non-negligible environmental impact. This observation was confirmed for the studied outer walls by the quantitative EC calculation, when compared to the reference wall. This identified impact is attributable to the fact that eco-construction is still very much rooted on conventional industrialised production chains, though geo- and biomaterials have the potential to be processed into building materials with a low environmental impact.

Extended abstract

Introduction

In 2020, buildings worldwide accounted for over a third of global energy demand and energy-related CO₂ emissions¹. The depletion of natural resources and the environmental pollution caused by the construction industry is consequently reaching peak levels year after year. To a large extent, these issues can be attributed to the ever increasing production of 'modern' construction materials such as concrete, steel, glass and plastics. In Western Europe, the industrial revolution heralded the beginning of mechanised and hyper-efficient production and transportation processes which have been optimised in order to promote the widespread use of modern materials, thereby directly or indirectly repressing ancient, vernacular building technologies. However, since environmental concerns have become widely acknowledged in the construction sector during the past decades, both researchers and practitioners are searching for new ways of building. In this, one way to limit the environmental impact of buildings of the future, is by adopting knowledge from the past.

Research question

Vernacular construction, an ancient type of 'anonymous' building practice specific to a certain region and period, is often considered – and rightfully so – as inherently environmentally friendly. In North-Western Europe, the majority of the pre-industrial vernacular came in some form of geo- and biobased construction. Different earth building technologies were in use. Each technique was characterised by the use of a specific earth mixture in which far more source materials were used than just its base material². In some techniques earthen elements had a loadbearing function, others relied on a timber structure so the earth became an infill system. Nonetheless, all different techniques were characterised by low values for contemporary concepts of the embodied energy and carbon [EC] contents³. This was due to the extraction of source materials in close proximity to the building site – geo- as well as biomaterials – and the use of low-tech treatment operations to process these into building materials. This way, vernacular construction was environmentally 'sustainable', as it met 'the needs of the [then] present without compromising the ability of [later] generations to meet their own needs'⁴.

Furthermore, the notion of 'meeting the needs' is here defined as 'durability'. This concept incorporates the ability of an object to last for a long period of time, whilst retaining its initial desirable properties to the maximum. For modern building components such as walls, these properties are characterised and verified in terms of quantitative parameters, such as compressive strength for the bearing capacity, or thermal transmittance for the insulation capacity. It is argued that vernacular earth construction, in general terms, was well able to meet then contemporary needs, but that these needs – which are quantifiable at present – have evolved over time and are continuing to do so.

In light of the environmental challenges future development is facing, the use of so-called pre-industrial construction materials is on the rise. Fibre-clay and lime plasters, hemp-lime insulation mixtures, daub – a mixture of straw and earth, strawbales,... are just some examples of these geo- and biobased materials that seem to have returned from extinction. Presenting a range of apparently ecological

1. United Nations Environment Programme 2021, p15

2. Therefore, it should be clear that the term 'earth construction' applies to a range of building techniques in which soil materials are a dominate material type but other sorts of materials are also used.

3. Embodied energy [carbon] is defined here as the total primary energy consumed [carbon released] from direct and indirect processes associated with a product or service and within the boundaries of cradle-to-gate. This includes all activities from material extraction [quarrying/mining], manufacturing, transportation and right through to fabrication processes until the product is ready to leave the final factory gate (Hammond en Jones 2011, p1).

4. Brundtland 1987, p54

alternatives to traditional modern materials, this phenomenon is to be assessed in terms of both notions of sustainability and durability, that are time and place dependent. An earthen outer wall from the 15th century is likely to score well on a range of aspects in such an assessment, but if an attempt was made to build the same wall again today, this recreation is expected to score differently due to inherently different material-technical and -economic contexts. Therefore, by taking into account both notions, this master thesis estimates the real potential of originally pre-industrial building techniques, based on geo- and biomaterials, for the design and realisation of contemporary, sustainable and durable wall constructions in North-Western Europe.

Methodology

In order to make this estimation, this master thesis has a twofold structure. The first part consists out of an historical analysis of the most frequently adopted vernacular earth construction techniques, based on a literature study. It is structured chronologically and consists of five chapters. At first, the 'basin dwelling'⁵, an enclosure excavated from the ground, is presented as the most primitive of all. Afterwards, the first wattle techniques, sod walls and massive timber walls are documented. To a certain extent, these can be considered as founding techniques for the most sophisticated and longest standing one, which is discussed in detail in the last chapter: the timber frame wall with earth infill elements. This type would develop into the dominant method of construction in North-Western Europe for over a millennium until the industrial age. For each technique, both the materials used as well as in which way their properties influence the wall construction are shown in increasing comprehensiveness. Furthermore, the associated building methods are mapped and the actors involved are indicated. This way, an image of the economy and ecology behind certain forms of vernacular earth construction is presented, in order to understand similarities and differences with the contemporary context.

In the second part of the master thesis, a different approach is adopted. In this part, specific examples of modern day geo- and biobased walls are discussed. 4 Belgian case studies of outer walls in residential low-rise are investigated: an newly built hemp-lime wall [wall A] in Eksaarde, a hemp-lime thermal refurbishment of a brick wall [wall B] in Edegem, a new daub wall [wall C] in Temse and a new strawbale wall [wall D] in Balegem. Each case was selected based on the extensive use of one or two biobased or geobased materials, and the associated sustainability, each thereby representing a 'new way' of construction. The point of the case studies is to make selective assessments of durability and sustainability, and to compare results with each other as well as with an opted reference wall; a conventional brick cavity wall with rockwool insulation [wall Z]. The durability assessment is reduced to an assessment of thermal properties. This way, the benchmark for further comparison is set on a similar thermal insulation value [wall A: 0,17 W/m²K, wall B: 0,17 W/m²K, wall C: 0,21 W/m²K, wall D: 0,17 W/m²K, wall Z: 0,20 W/m²K]. For the sustainability study, an in-depth embodied carbon calculation of each wall is made. Though it is acknowledged that the EC content only represents one way of measuring environmental sustainability, it is argued to be a representative indicator in quantitative comparative research. However, to arrive at a quantifiable EC value, qualitative research is first carried out. Based on technical and photographic documents, and by consulting parties involved⁶, the wall compositions and building methods are documented, and the same is done in detail for materials used and their corresponding production processes.

5. Literal translation of the Dutch term 'komwoning'.

6. These parties were architects, researchers, manufacturers, distributors, installers and owners.

The conducted quantitative analysis has a twofold aim. Firstly – and similar to the historic analysis – an image of the material economy and building methods of modern geo- and biobased construction is presented. Secondly, documenting production- and treatment processes of building materials is a necessary step towards an EC calculation, as each step in a process potentially includes a certain carbon production that needs to be taken into account.

The actual calculation relies mainly on the use of the Totem tool⁷, that adopts the MMG⁸ assessment framework. In this tool, the existing wall compositions are modelled, after which an automatic calculation is made of a number of established environmental indicators⁹, of which the EC content is one.

Results

The literature study showcased how earth construction was characterised by a far-reaching dependency on the immediate environment, before production became largely mechanised and transport networks no longer relied on human and animal labour. The use of different types of wood in early wattle techniques is a clear example of this dependency. In the coastal regions, only soft and supple timber was available in sufficient quantities, which lead to a type of outer wall construction that was deliberately conceived as non-load-bearing. The same reliance on appropriate timber lasted throughout the later timber-frame construction techniques too. As well as being majorly responsible for vast deforestation, the treatment of fresh wood into timber was also a labour-intensive process, with a high 'cost' in manhours. Therefore, timber frames were increasingly conceived, built and reused as sets of dismountable parts. In any case, knowledge of rural dwelling walls slowly – perhaps even naturally – developed as a trail-and-error process and together with most necessary tools became embedded within each local community, within most dwelling-owners even.

The environmental impact of any of these walls was low. With regards to embodied carbon, both the production of untreated timber, the excavation and mixing of suitable soils and the collection and treatment of plant or animal fibres are processes with negligible environmental impact. The same is true for the manual construction of the walls. Neither in production nor construction mechanised power was used. The small amount of carbon released is attributable to the rotting of plant fibres as part of treating the earth mixture, and to human and animal metabolism. Only later practices of tarring timber parts, and especially the use of lime in wall finishes or as a constituent part of the earth mixture, involved processes in which carbon was released, through the burning of wood and the calcination of limestone respectively. However, these materials would not be applied in large quantities. Furthermore, this effect is partially negated through the hardening reaction of calcinated lime, which involves a limited intake of earlier released carbon. The same applies to the end-of-life of the considered materials. Since no chemical properties were altered throughout the materials' lifecycles – with the exception of wood tar and lime – direct disposal into the environment was a common and justifiable practice. The difference in service life between structure, wall filling and wall finishing is irrelevant in this context, as maintenance was – again – carried out by hand and by using the same natural products.

The qualitative analysis of the modern geo- and biobased walls presents a vastly different image. In most cases, owners no longer master the construction and maintenance of their own dwelling. This is in part due to the need for regulated

7. Totem [Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials] is a Belgian calculation tool that is developed in order to provide support to its construction sector in objectifying and reducing the environmental impact of buildings.

8. Dutch: Milieugerelateerde Materiaalimpact van Gebouw(element)en

9. According to EN 15804+A2, the environmental impact of a material is calculated as a set of environmental scores on 19 'impact indicators'. For further explanation of these indicators, see (Chung Lam and Trigaux 2021).

quantification of properties such as insulation values or bearing capacity, so as to ensure comfort, safety and energy-efficiency, as well as the need to guarantee these properties over an extended amount of time with as little maintenance as possible. Thus, the identification of present-day material accounts clarifies how the North-Western European building sector is now a complex and specialised industry in all its facets, from production until demolition. Remarkably, this also still applies to the 'ecological' construction branch, though it is based on the use of pre-modern materials. The 4 studied geo- and biobased walls incorporate a striking variety of materials [wall A: 9, wall B: 7, wall C: 5, wall D: 7] that each originate from a range of complex processes. This increased complexity becomes especially clear in the treatment of timber, earth, reinforcement meshes and lime based products. Furthermore, the base materials timber and lime are never exploited locally, with minimal total transport distances of 231 km [wall D] and 208 km [wall B] respectively. In wall A, even the earth and straw are sourced over tens of kilometres. Of course, the transport is done by train, boat [timber] and truck.

The increased complexity in material accounts translates into a non-negligible quantitative environmental impact. For walls A,B,C and D embodied carbon values of 96, 188, 69 and 108 [kg CO₂ eq./ m²] were calculated. Compared to the calculated EC of the reference wall Z [136 kg CO₂ eq.] these are fairly high. The high EC value of wall B is mostly due to the extensive use of lime plasters. This way, it is shown how the properties and durability of many modern geo-based walls rely to a greater or lesser degree on a derivative geo-based product: calcinated lime. Its production is similar to that of cement, and therefore also incorporates a significant – yet smaller – carbon release. In any case, the use of lime as a binder in earth or plant fibre mixtures increases a wall's environmental impact, but if required, this type of binder is much more appropriate than cement from an ecological point of view.'

Conclusion

In this master thesis, the potential of pre-industrial construction for future applications was examined by focusing on the outer wall. In eco-construction, past practices are often looked at as inspiring examples. However, this is only true to a certain extent. It should be noted that different and more stringent requirements now apply to the outer wall and that modern construction takes place in a completely different socio-economic context than in the past. In vernaculaire dwelling, the building owner mostly built for himself by necessity, and construction was 'tailored to the human being'. This condition was at the root for a local use of materials and made intensive maintenance – by modern standards – necessary and possible. Because this only still applies to a very limited extent today, today's geo- and biobased construction should not be lumped together with that of centuries ago. Modern eco-materials are based on vastly different production and treatment processes than in the past, in which local manual labour is largely replaced by a few centralised and largely mechanised processes. This way, ecological construction is still very much rooted on conventional industrialised production chains. The conducted analysis has showcased how, as long as chemical bonds in [fossil] fuels substitute man-hours, vernacular building knowledge is only viable to a limited extent.

However, intrinsically, geo- and biomaterials do have the potential to be processed into building materials with a low environmental impact, as they are omnipresent and eligible to low-tech treatment operations. Based on a quantitative and qualitative study, this thesis research argues that this potential can only be properly fulfilled

under two conditions. Firstly, the materials should be used appropriately within a construction, which is a structural question. Secondly, the different steps in a material lifecycle are to be optimized according to principles that are independent of conventional industrial logic, as the steps from raw to finished material and back determine the final product's impact at least as much as it's intrinsic properties. This means a more localised and less high-tech production, and more maintenance. Therefore, plenty of opportunities become apparent in order to get to this point, such as the advent of contractors that are specialised in testing soils in situ for their suitability and using them in small scale projects, the refinement of the cultivation of certain crops as to increase the value of their waste flows, subsidised maintenance periods for private owners,... Legislation could enable the wide spread of such practices.

In looking at past construction, not only a structural but also a economic perspective should be adopted. Only then, a thorough understanding of prevailing conditions is possible and lessons can be learned.

Inhoud

Vraagstelling en methodiek	15
Inleiding	16
Vernaculair bouwen en duurzaamheid?	18
Onderzoeksvraag	23
Methodiek	24
Deel 1: Een bouwtechnische bloemlezing van de historische wand	25
De komwoning zonder wand	27
Vlechtwerk en de eerste staande wanden	28
De plaggenwand	34
Massieve wanden uit hout	35
Het vlecht- en vakwerk als culminatie van technieken	38
Het houtskelet	38
De wandinvulling	46
Deel 2: Aarde als modern bouw materiaal, een terugkeer naar vroeger?	59
Deel 3: Geo- en biogebaseerde wanden in kaart gebracht	64
Caseselectie: het verhaal van 4 moderne buitenmuren	65
Wand A: Kalkhennep in nieuwbouw, Eksaarde	67
A1. Basislaag kalkpleister	72
A2. Wapeningsnet	77
A3. Hecht kalkpleister	78
A5. Kalkhennep	81
A6. Houtskelet	85
A7. Wilgenmat	88
A8. Basis leempleister	91
A9. Leemfinish	95
Wand B: Kalkhennep in renovatie, Edegem	107
B1. Floatcoat kalkpleister, buiten	113
B2. Scratchcoat kalkpleister, buiten	116
B3. Houtskelet	117
B4. Kalkhennep	118

<i>B5. Scratchcoat kalkpleister, binnen</i>	119
<i>B6. Floatcoat kalkpleister, binnen</i>	120
<i>B7. Finishing coat kalkpleister, binnen</i>	120
Wand C: Stroleem in renovatie, Temse	127
<i>C1. Kalkcementpleister</i>	133
<i>C2. Leemputz</i>	135
<i>C3. Stroleem</i>	135
<i>C4. Houtskelet</i>	138
<i>C5. Leempleister</i>	139
Wand D: Strobalen in nieuwbouw, Balegem	143
<i>D1. Gekleurde kalkpleister</i>	149
<i>D3. Basis traskalkpleister</i>	151
<i>D4. Wilgentak</i>	152
<i>D5. Strobaal</i>	152
<i>D6. Houtskelet</i>	153
<i>D7. Rietmat</i>	155
Recapitulatie	160
Duurzaamheidevaluatie	163
Durability: themisch isolatievermogen	164
Sustainability: Embodied Carbon berekening	165
Besluit	172
Geannoteerde bibliografie	175
Opzet	176
Ordering per thema	177
Bibliografie	178
Bronnenlijst figuren	191
Bibliografie	191

Lijst van figuren

Fig.1: Plattegrond van een bandkeramisch huis uit Stein, Nederlands-Limburg	26	Fig.21: Transport: basislaag kalkpleister	65
Fig.2: Reconstructie van een nederzetting in Ezingen, 3e - 4e eeuw v.C.	27	Fig.22: Transport: Houtvezelplaat	73
Fig.3: Een woonfase in de opgravingen van de eerste terp in Ezingen, 3e - 4e eeuw v.C.	27	Fig.23: Transport: SLS	79
Fig.4: Plaggenhut te Onstwedde, circa 1915	27	Fig.24: Transport: Wilgenmat	81
Fig.5: Paalwerkwand met voetplaat	31	Fig.25: Transport: Basis leempleister	85
Fig.6: Inkervingen	31	Fig.26: A1. Basislaag Kalkpleister Flowchart productie	90
Fig.7: De maand Februari in het Getijdenboek van de Hertog van Berry, door de Gebroeders van Limburg, ca. 1410	38	Fig.27: A2. Wapeningsnet Flowchart productie	91
Fig.8: Pen-en-gat verbinding	39	Fig.28: A3. Hechtalkpleister Flowchart productie	92
Fig.9: Genummerde onderdelen in het vakwerkskelet, Poperinge	39	Fig.29: A4. GUTEX Thermowall: Flowchart productie	93
Fig.10: Invulwand uit vlechtwerk	46	Fig.30: A5. EXIE Canadry Flowchart productie	94
Fig.11: Invulwand uit vlechtwerk	46	Fig.31: A6. SLS geïmpregneerd Flowchart productie	95
Fig.12: De aanbidding van het kind, door de Meester van Flémalle (1375 - 1444)	47	Fig.32: A7. Wilgenmat Flowchart productie	96
Fig.13: Detail van ruitvormig gevlochten strobanden, schuur in Hezingen	47	Fig.33: A8. Basis leempleister Flowchart productie	97
Fig.14: Vakwerkwanden in Liedekerke	48	Fig.34: A9. Basis leempleister (finish) Flowchart productie	97
Fig.15: Detail van een vakwerkwand in Slenaken	48	Fig.35: Wand B: context	100
Fig.16: Wand A: context	62	Fig.36: Wand B	100
Fig.17: Wand A: dakoversteek	62	Fig.37: Wand B: detail afwerking	100
Fig.18: Wand A: detail van verschillende afwerkingen	62	Fig.38: Wand B: kalkhennep	101
Fig. 19: Wand A type m2	63	Fig.39: Wand B: scratchcoat	101
Fig. 20: Wand A muurvoet	64	Fig.40: Wand B: 3 pleisterlagen, binnen	101

Fig. 41: Wand B type m2	102	Fig.63: C1. Cementkalkpleister Flowchart productie	131
Fig. 42: Wand B muuraanzet	103	Fig.64: C3. Stroleem Flowchart productie	132
Fig.43: Transport: Carmeuse hydraatkalk	105	Fig.65: C4. Lorkenhout Flowchart productie	133
Fig.44: Transport: Trasswerke Meurin tras	106	Fig.66: Wand D: context	136
Fig.45: Transport: Trasswerke Meurin tras	108	Fig.67: Wand D: detail afwerking	136
Fig.46: Transport: Hennepscheven	109	Fig.68: Wand D: buitenpleisters	136
Fig.47: Transport: Lommelzand	112	Fig.69: Wand D: structuur	137
Fig.48: B1. Floatcoat kalkpleister, buiten Flowchart productie	113	Fig.70: Wand D: binnenkant	137
Fig.49: B2. Scratchcoat kalkpleister, buiten Flowchart productie	114	Fig.71: Wand D: constructie	137
Fig.50: B5. Scratchcoat kalkpleister, binnen Flowchart productie	115	Fig. 72: Wand D type m2	138
Fig.51: B6. Floatcoat kalkpleister, binnen Flowchart productie	116	Fig. 73: Wand D muurvoet	139
Fig.52: B7. Finishing coat kalkpleister, binnen Flowchart productie	117	Fig.74: Transport: gekleurde kalkpleister	140
Fig.53: Wand C: context	120	Fig.75: Transport: traskalkpleister	142
Fig.54: Wand C: detail afwerking, buiten	120	Fig.76: Transport: Vurenhout	145
Fig.55: Wand C: constructie	120	Fig.77: D1. Gekleurde kalkpleister Flowchart productie	147
Fig.56: Wand C: constructie	121	Fig.78: D3. Basis traskalkpleister Flowchart productie	148
Fig.57: Wand C: schuifbekisting	121	Fig.79: D6. Vuren geïmpregneerd Flowchart productie	149
Fig.58: Wand C: uitdrogen van de wand	121	Fig.80: D7. Rietmat Flowchart productie	150
Fig. 59: Wand C type m2	122		
Fig. 60: Wand C muurvoet	123		
Fig.61: Transport: strobalen	127		
Fig.62: Transport: leemgrond	129		

Vraagstelling en methodiek

Inleiding

In 1986 werd in Chicago een boekje gepubliceerd met als titel 'Natural Energy and Vernacular Architecture'. Dit werk was de op één na laatste publicatie van de hand van de Egyptische architect Hassan Fathy¹⁰. De opzet van het boek werd in het voorwoord verklaard door de stellen dat 'het veld van vernaculaire architectuur een overvloed aan concepten aanreikt die vandaag van nut kunnen zijn in het oplossen van de kritieke staat van huisvesting waarin miljoenen verkeren in de Derde Wereld'¹¹. Om deze theorie uit te werken werd professor Fathy als de meest geschikte persoon aanzien, aangezien hij een expertise in traditionele Arabische architectuur had opgebouwd sinds de start van zijn carrière eind jaren '20. Zijn geschreven en gebouwd werk had al aangetoond hoe traditionele architectuur kan worden ingezet in het verbeteren van de behuizing van 'de armen van de Derde Wereld'. Maar de impact van Fathy's oeuvre ging verder dan alleen deze doelgroep. 'Natural Energy and Vernacular Architecture' kan worden gelezen als de culminatie van een levenslange ontwerppraktijk en studie van de omgeving, waarin Fathy zich op zijn diepgaand onderzoek naar de controle van het binnenklimaat baseert om het voordeel van lokale bouwmaterialen en het gebruik van traditionele bouwmethodes in moderne constructies aan te tonen. In een reactie op de 20e -eeuwse bouwpraktijken van zijn tijdsgenoten argumenteerde de Egyptenaar dat architecten traditionele bouwmethodes grondig moeten analyseren aan de hand van wetenschappelijke principes en een begrip van sociale en culturele noden alvorens er ook maar één van te verwerpen. Maar tegelijk is er volgens Fathy een even grondige analyse nodig van moderne bouwtechnieken, gebaseerd op dezelfde methodiek, alvorens daar ook maar één van te aanvaarden. Een architect, zo benadrukt Fathy, verkeert in de unieke positie om het geloof van mensen in hun eigen cultuur te revitaliseren¹². Wanneer hij laat zien op welke manier lokale vormen bewonderenswaardig zijn en zover gaat om ze ook in zijn eigen praktijk te gebruiken, dan zullen mensen opnieuw naar hun 'eigen producten' kijken met trots.

Fathy was overigens niet de eerste die zich liet inspireren door vernaculaire architectuur. In 1910, zo'n 20 jaar voor de start van zijn carrière, beschreef de Oostenrijker Adolf Loos al een Alpenmeer waarrond huizen, boerderijen, binnenhoven en kapellen lagen alsof ze rechtstreeks afkomstig waren uit Gods werkplaats. Zijn romantisch beeld was dat van een boer wiens doel was een huis te bouwen voor zijn 'familie en veestapel, en hierin is hij geslaagd. Net zoals zijn burens of zijn grootouders hierin slaagden. Net zoals elk dier dat zichzelf toelaat zich te laten leiden door zijn instincten, slaagt'¹³. Frank Lloyd Wright schreef in hetzelfde jaar over 'volks bouwen dat groeit als reactie op actuele noden, en dat in een omgeving wordt gepast door mensen die niet beter wisten dat het in te passen met een "inheems" gevoel'¹⁴. Deze citaten zijn slechts 2 illustraties van een houding die door vele architecten werd aangenomen in de vormende jaren van het modernisme, toen een erkenning van het bestaan van bouwtradities die niets te maken hadden met 'professionele' architectuur niet ongewoon was. Een decennium later stond de uitgeculmineerde moderne beweging echter al lijnrecht tegenover de instandhouding van deze tradities. Onder de manifesten die het 'nieuwe tijdperk' uitriepen, pleitte Le Corbusier in zijn 'Vers une Architecture' voor het compromisloze gebruik van moderne materialen zoals vlakglas, gewapend beton en staal als een essentiële voorwaarde voor een betere toekomst¹⁵. De architect was desondanks sterk beïnvloed door de witgekalkte muren van de dorpen in het Middellands Zeegebied die hij in 1911 op zijn 'voyage d'Orient'

10. Hassan Fathy (1900 – 1989) was een Egyptische architect die bekend werd als pionier in het bestuderen en toe-passen van traditionele Egyptische bouwtech-nieken en materialen in moderne constructies.

11. Fathy 1986, p xvii

12. Ibid., p xx

13. Oliver 2003, p9

14. Ibid.

15. Steele 1997, p11

aandeed, maar de indruk die vernaculaire architectuur op Le Corbusier naliet zou zich slechts manifesteren in het formuleren van nieuwe paradigma's die moderne architectuur in de 20e eeuw richting zouden moeten geven. Vernaculair bouwen werd door vele moderne architecten gereduceerd tot stijlprincipes zoals een zekere zuinigheid in vorm en ontwerp, een helderheid en eenvoud, en een ongegeneerd, onverhuld gebruik van materialen.

Voor Fathy moest er een harmonieuze balans bestaan tussen mensen, natuur en architectuur, en daarom meende hij dat technologie in dienst diende te staan van sociale waarden en aangepast moest zijn aan menselijke behoeften. Traditionele architectuur betekende voor hem veel meer dan een inspiratiebron voor een nieuwe stijl. Fathy geloofde dat 'het resultaat van de interactie tussen de mens en zijn omgeving cultuur schept en heeft geleid tot de ontwikkeling van een veelheid aan culturen door verschillende mensen in verschillende omgevingen'¹⁶. Vernaculaire architectuur, zo stelt Fathy, is één van de meest concrete manifestaties van deze interactie. Maar naast een manifestatie houdt ze tevens oplossingen in. Fathy had in de jaren '80 ook al opgemerkt dat de wijdverspreide mechanisering tot energietekorten aan het leiden was in geïndustrialiseerde landen. Vanuit dit oogpunt boden oplossingen die waren ontwikkeld door generaties van traditionele samenlevingen, welke bij het bouwen alleen maar gebruik maakten van natuurlijke materialen en energiebronnen, een grote hulp bij het onderzoek naar nieuwe bouwmethodes. En inderdaad, hier betreft het een 'bouwpraktijk' en geen 'architectuur'. Fathy was verre van blind voor de schoonheid van traditionele architectuur, die hij zag als een gedeelde kunst die gewoonten en tradities van een gemeenschap uitdraagt, maar ook, en vooral, bestudeerde hij als één van de eersten het vernaculaire bouwen vanuit een bouwtechnische optiek. Zijn pragmatische houding tegenover het verleden werd gedeeld door de Griekse architect Demetri Porphyrios, die in 1982 schreef¹⁷:

'It is not stylistics we have in mind, but rather the universal ethos of constructing shelter under the stringent conditions of scarcity of materials and operative constructional techniques. [...] Instead, the essential meaning of the vernacular refers to straightforward construction, to the rudimentary building of shelter, an activity that exhibits a catholicity of reason, efficiency, economy, durability and pleasure.'

Europa heeft Fathy dus leren kennen als één van de eerste schrijvende architecten die trachtte de afstand tussen de 'architectuur van het volk' en de 'architectuur van de architect' te overbruggen. Dit deed hij door in zijn eigen bouwpraktijk gebruik te maken van een op vernaculaire leest geschoeide vormgeving van gebouwcomponenten en door het toepassen van traditionele materialen. Een goede illustratie hiervan is meteen wellicht zijn meest bekende project: de bouwen van het dorp New Gurna in 1945, waarin hij massaal gebruik maakte van het Nubische leemsteengewelf om overspanningen te realiseren in toenmalig moderne woonsten. Vandaag kan een West-Europese architect Fathy raadplegen als grondlegger van een 'new vernacular', als een gediplomeerde ontwerper die de wijsheid bezat om naar mensen te kijken die hem het bouwen al eeuwen voordeden. Het is deze instelling, die vooralsnog op weinig meer dan een idee is gebaseerd, die ook aan de basis ligt van deze thesis. Fathy werkte dan wel in de specifieke context van het moderniserende Egypte van de 20e eeuw, waarbij enerzijds een discrepantie ontstond tussen de traditie van het bouwen met aarde en 'moderne' westerse technieken die er toch niet in slaagden alle lagen van de maatschappij te huisvesten, en dat

16. Fathy 1986, p69
17. Porphyrios 1982, p 56

anderzijds wordt gekarakteriseerd door een heet en droog klimaat, toch liet hij een intellectuele erfenis na die tot ver buiten zijn geboorteland een impact heeft gehad. Fathy was één van de eersten die een discours van verzet ontwikkelde tegen de alom heersende vooruitgangsgedachte die elk facet van westerse samenlevingen en hun invloedssferen elders¹⁸, inclusief architectuur, karakteriseerde en dat – misschien wel – nog steeds doet. Of misschien is het correcter om te stellen dat Fathy zich niet verzette tegen modernisering, maar pleitte voor een genuanceerd gebruik van dat wat 'nieuw' is, en een inzetbaarheid van dat wat 'oud' is. Het inzetbare karakter van traditionele architectuur is een piste die velen nadien zijn blijven onderzoeken, en die ons leidt tot het ontwikkelen van een onderzoeksvraag.

Vernaculair bouwen en duurzaamheid?

Wat kunnen we leren uit traditionele architectuur? Dit lijkt op het eerste zicht een eenvoudige vraag, één waar men misschien een ingewikkeld antwoord op kan geven, maar desondanks een korte, eenvoudige vraag. Dat is echter niet zo, en wel voor 2 redenen. De eerste reden betreft de woordkeuze; waarover spreken we wanneer we het hebben over 'traditionele architectuur'? 'Traditie' duidt op een fenomeen dat een lange voorgeschiedenis heeft, die, afhankelijk van de vergankelijkheid van het fenomeen, zelfs kan terug gaan tot voor de geboorte van de oudst levende persoon. Maar tegelijk impliceert de notie van de 'traditie' een gedwongen herhaling, omdat wat al zo lang meegaat de volgende keer ook wel zal werken¹⁹. En wat is dan 'architectuur'? Aan het beantwoorden van die vraag zal ik mij nooit wagen, laat staan in het beperkte bereik van een masterthesis. Men kan echter wel stellen dat de term 'architectuur' een containerbegrip is dat over meer gaat dan het louter bouwen¹³. 'Traditionele architectuur' leek dus een eenvoudig te begrijpen concept, maar de vraag zou al een stuk minder dubbelzinnig worden door in plaats van het te hebben over 'traditionele architectuur', te spreken over 'het vernaculaire bouwen', wat op zijn beurt ook weer een verklaring vereist, maar dit komt later. Wat kunnen we dus leren uit het vernaculaire bouwen? De tweede en belangrijkste reden echter waarom dit geen eenvoudige vraag is, gaat naar mijn mening niet over woordkeuze maar over het inschatten van de legitimiteit van de vraag zelf. Waarom zou dit een zinvolle vraag zijn?

Wanneer men zich afvraagt welke lessen er kunnen worden getrokken uit het verleden gaat men er al impliciet van uit dat er überhaupt iets is wat het verleden ons kan leren. Waar dit een relatief voor de hand liggende instelling is voor maatschappelijke kwesties – en dan vooral wat betreft tragedies die nooit opnieuw mogen gebeuren – is het dat niet meteen voor de bouwwereld. Men kan zich met rede afvragen of een 21e -eeuwse West-Europese samenleving naar haar bouwhistorisch verleden zou moeten omkijken om oplossingen te vinden voor problemen die zich stellen in toekomstige bouwprojecten. Het is paradoxaal genoeg wellicht onmogelijk om op deze ja-nee-vraag te antwoorden met 'ja' of 'nee', en hiertoe zal in deze scriptie dan ook geen poging worden ondernomen. Deze scriptie werd nu eenmaal ondernomen vanuit de opinie dat het antwoord 'ja' is, maar wel genuanceerd kan en moet worden. Deze hypothese leunt aan en steunt op de theorieën van een aantal historici en architectuurcritici, die de notie van een 'bruikbaar' bouwkundig verleden hebben geconceptualiseerd voor verschillende dimensies. Zo klaagde Hassan Fathy in zijn tijd aan dat de productie van schoonheid werd verdrongen door industrialisatie, en hij moedigde een dieper respect voor het gebruik van traditie in architectuur aan. Hij suggereerde dat het de verantwoordelijkheid is van elke architect om

18. Met het schrijven van 'westerse samenlevingen en hun invloedssferen elders' wordt hier niet gepleit voor een Eurocentrisch perspectief. Het is echter wel correct te stellen dat er doorheen de 20e eeuw een intensieve wisselwerking bestond tussen een aantal Westerse landen en hun (ex-) kolonies, die op veel vlakken door een onevenwicht werd gekarakteriseerd. Groot-Brittannië en Egypte zijn hier een voorbeeld van.

19. 'Traditie' komt van het latijnse 'tradere', wat zoveel betekent als voortdragen of overzetten, en duidt volgens James Steele (Steele 1997, p 20) dus op de cyclische vernieuwing van het leven.

20. Een theoretische discussie en argumentatie van deze stelling valt buiten de doelstelling van deze thesis, dus citeer ik gemakshalve Hans Hollein: 'Alles ist Architektur'. De student die een semester lang op een ontwerp zwoegt – één dat nooit een werf zal zien – gaat ongetwijfeld graag akkoord.

een bewustwording te ontwikkelen voor persoonlijke gewoontes, die samen een sociale analogie en dus traditie vormen²¹, en deze te incorporeren in het ontwerp. Maar ook dicht bij huis pleitten Vlaamse volkskundigen zoals Jozef Weyns²² in de jaren '60 en '70 tegen de teloorgang van oude bouwwerken, want volgens hem 'ligt in het [traditionele] boerenhuis een belangrijke brok cultuurgeschiedenis, of, anders uitgedrukt, een eerbiedwaardige som van menselijke waarden'²³. Op deze maatschappelijk-culturele dimensie van een bruikbaar bouwkundig verleden wordt in deze thesis echter niet verder ingegaan. Wat wel centraal staat in de ontwikkeling van de onderzoeksvraag is haar technische dimensie.

De overtuiging dat men iets kan leren uit het vernaculaire bouwen berust op het feit dat het vernaculaire zeer vaak wordt geassocieerd met het concept van duurzaamheid. Deze observatie zal worden verklaard aan de hand van deze technische dimensie van het bouwverleden en op dezelfde manier kan ze worden gelegitimeerd als aanleiding voor een thesisonderzoek. Aangezien de begrippen 'vernaculaire architectuur' en 'vernaculair bouwen' al meerdere keren werden aangehaald loont het de moeite om ze nu te definiëren. Daarnaast verdient het concept 'duurzaamheid' dezelfde uiteenzetting. Alleen dan kan worden verklaard waarom de 2 gelieerd zijn en op welke manier dit terecht is.

Wat is dan juist vernaculair bouwen? De term wordt in de literatuur al sinds het midden van de 19e eeuw gebruikt²⁴ om te spreken over architectuur en talloze schrijvers hebben er een eigen definitie aan gegeven. Zo definieerde Fathy het onder andere als 'de architectuur van het volk' en Porphyrios als 'straightforward construction'. Een naar mijn mening mooie en eenvoudige definitie wordt gegeven door de titel van een bekende tentoonstelling, die in 1964 in het Museum of Modern Art te New York plaatsvond: 'Architecture Without Architects'. De curator Bernard Rudofsky sprak over de 'Non-Pedigreed Architecture'²⁵ die werd tentoongesteld als 'vernaculair, anoniem, spontaan, inheems, landelijk'²⁶. Vernaculaire architectuur wordt dus niet ontworpen door architecten, ontleent daarom haar auteurschap aan 'het volk', en wordt daarom ook gekenmerkt door weinig stijlbekommernissen en een rechtlijnige manier van bouwen. In die zin zijn termen als 'vernaculaire architectuur' en 'vernaculair bouwen' wel inwisselbaar – waar 'architectuur' en 'bouwen' zonder meer dat niet zijn – aangezien architectuur in deze context veel meer met het feitelijke bouwen te maken heeft dan wanneer er architecten aan te pas komen. Met deze definitie in het achterhoofd, kan men wel stellen dat er in België sinds de architectenwet van 1939 geen vernaculaire architectuur meer wordt bijgebouwd, en deze vorm van architectuur dus per definitie 'oud' is in West-Europa.

En wat is dan juist duurzaamheid, of al preciezer geformuleerd; wat is dan juist duurzame architectuur? Dat is een begrip dat veel meer ter discussie staat. Een bekende en naar mijn mening correcte definitie van duurzame ontwikkeling die ook kan worden toegepast op architectuur luidt als 'de ontwikkeling die voorziet in de huidige noden zonder de mogelijkheid te compromitteren voor toekomstige generaties om in hun eigen noden te voorzien'²⁷. 2 essentiële concepten zitten hierin vevat: het beantwoorden aan huidige noden en het minimaliseren van een negatieve impact op de toekomst. In de Nederlandse taal worden beide concepten ongenueanceerd samengevat als duurzaamheid, in het Engels wordt er een gepast onderscheid gemaakt tussen respectievelijk 'durability' en 'sustainability'. Dat de huidige bouwwereld het wereldwijd niet goed doet wat betreft het laatste is een understatement. Tijdens het Covidjaar 2020, dat werd gekenmerkt door een relatief

21. Steele 1997, p 20

22. Jozef Weyns (1913 – 1974) was een Vlaamse volkskundige en museumconservator. Hij voerde onderzoek en publiceerde boeken en artikels over oude Vlaamse hoeven, en begon in 1953 aan de bouw van het openluchtmuseum Bokrijk, waar hij ook de eerste conservator werd.

23. Weyns 1967, p 7

24. Oliver 2003, p 12

25. Dit wordt letterlijk vertaald als 'niet-raszuivere architectuur', wat meteen impliceert dat alleen architecten 'raszuiver' kunnen bouwen.

26. Rudofsky 1987, pp 1,58

27. Brundtland 1987, p 54

lage activiteit in de bouw, was de constructie en uitbating van gebouwen nog steeds verantwoordelijk voor 37 procent van de globale energie-gerelateerde CO₂ uitstoot, of zo'n 32 gigaton in één jaar. In datzelfde jaar bedroeg de energievraag van de bouwsector 36 procent van de totale energievraag²⁸. Dit zijn maar 2 statistieken die duidelijk laten zien dat de wereldwijde bouwsector een enorme bijdrage levert aan de uitstoot van broeikasgassen – rechtstreeks of indirect – en dus actief betrokken is bij de klimaatverandering. Het hoeft geen betoog dat dit wel degelijk de 'mogelijkheid voor toekomstige generaties om in hun eigen noden te voorzien' compromitteert. Bij duurzame architectuur – in deze betekenis van het woord – wordt de impact op het milieu van de constructie, uitbating en afbraak van een gebouw tot een minimum gereduceerd. De ecologische voetafdruk van een gebouw kan worden gemeten door middel van een levenscyclusanalyse (LCA), waarin per materiaal een berekening wordt gemaakt van de milieu impact van dit materiaal doorheen haar hele levensspan²⁹. Deze thesis zal ingaan op deze milieutechnische kant van het begrip 'sustainability' van een gebouw. Er moet echter worden opgemerkt dat de bouwwereld ook op een socio-economische en socio-culturele manier een impact heeft op de toekomst²³. Maar net zoals bij, en aansluitend op, de passage over een 'bruikbaar verleden', zal de focus vanaf nu ook wat betreft duurzaamheid liggen op de technische dimensie; op het reduceren van de milieu impact van gebouwen.

Want waarom wordt vernaculaire architectuur dan vaak in één adem genoemd met duurzaamheid? Dat heeft alles te maken met de eigenheden aan het pré-industriële tijdperk, waarin de meerderheid van de bevolking afhankelijk was van haar onmiddellijke omgeving voor energievoorziening en de uitwisseling van materie. Vernaculair bouwen wordt gekenmerkt door het gebruik van lokale en natuurlijke materialen met lage vervatte energie³¹. Deze materialen werden ter plaatse geproduceerd, verwerkt en gebruikt in de constructie, in processen die verenigbaar waren met de natuurlijke omgeving, en die regeneratie van materiaal toelieten. Een gevelde eik kon worden verwerkt tot een moerbalk die voor honderden jaren mee ging, tot er al lang een nieuwe eik was gegroeid. Op deze manier werd het vernaculaire gebouw geïntegreerd in de omgeving en berokkende het geen schade aan andere elementen uit het ecosysteem. Wanneer een gebouw moest worden afgebroken of er bouwafval werd geproduceerd op de werf, had dit dan ook nauwelijks een ecologische impact, want de natuur was in geen enkel gebouwcomponent ver te zoeken. Fernandes et al. vatten het mooi samen door te stellen dat 'de meest relevante milieutechnische voordelen van lokale materialen zijn: geen nood aan transport, een weinig energie-intensief productieproces en bijgevolg een lagere vervatte energie inhoud en [weinig] CO₂ emissies; het zijn natuurlijke materialen; vaak organisch, hernieuwbaar en biologisch afbreekbaar, met een 'cradle to cradle'³² levenscyclus [en een] lage milieu impact gedurende onderhoudsoperaties'³³. Bovendien berustten bouwprocessen op mankracht in plaats van op mechanische energie en bouwtechnieken werden gebaseerd op het lokale klimaat en topografische condities. Gewoonlijk bepaalde het plaatselijke terrein de gebouwkarakteristieken, in overeenstemming met de 'genius loci' van de site, om zo menselijk comfort te realiseren in binnen- en buitenruimtes³⁴ – denk ook aan Fathy's onderzoek. Met de opkomst van de Industriële Revolutie, die in België net voor de start van de 19e eeuw 'began', werd de relatie tussen de gebouwde omgeving en haar omliggende voorzieningsbekken verbroken. Het industrialiseren van de beton-, staal- en glasproductie wijzigde de bouwsector drastisch en tegelijk werd de industrie vanaf dat moment gebaseerd op sterk vervuilende en

28. United Nations Environment Programme 2021, p 15

29. Deze hele levensspan houdt in: ontginning van rauwe grondstoffen, verwerking van grondstoffen tot een product, transport, installatie, onderhoud, afbraak, eventueel hergebruik of recyclage. Volgens EN 15804+A2 wordt de milieupact van een materiaal berekend als een set van milieuscores op 19 'impactindicatoren'. Voor meer uitleg over deze indicatoren wordt verwezen naar (Chung Lam en Trigaux 2021).

30. Volgens VerSus, een Europese onderzoeksgroep die onderzoek voert naar duurzaamheid in (vernaculaire) architectuur, zijn er 3 dimensies aan het gegeven 'sustainability'. Er is de milieutechnische dimensie, die handelt over de menselijke capaciteiten om met bewuste interventies een negatieve impact op het milieu te reduceren. Verder is er de socio-culturele dimensie, die alle menselijke relaties, samenhangsgevoel, identiteit en persoonlijke en gemeenschapsontwikkeling inhoudt. Ten laatste is er ook de socio-economische dimensie, die als meest kwantitatieve dimensie financiële en monetaire kwesties als basisindicatoren gebruikt (Letizia Dipasquale en Saverio Mecca 2014, p 24).

31. De vervatte energie staat voor de totale hoeveelheid energie die verbruikt wordt

energieverslindende processen. Vanaf dit moment stond economische ontwikkeling gelijk aan de ontwikkeling van intensievere exploitatietechnieken van de natuurlijke omgeving³⁵. Het is dus eenvoudig aan te voelen dat de milieu impact van een 16e -eeuwse leemhoeve per oppervlakte-eenheid geringer is dan die van een doorsnee 21e -eeuws kantoorgebouw, en het vernaculaire bouwen dus bijna intrinsiek duurzamer is dan haar moderne variant.

De aandachtige lezer heeft ondertussen al opgemerkt dat er sinds de introductie van duurzaamheid als een tweeledig begrip, helemaal niet meer gesproken is over 'durability'. En inderdaad, dat houdt het ook in. Dit aspect van duurzaamheid houdt rekening met het vermogen van een object om lang mee te gaan doorheen de tijd, waarbij het zijn initiële eigenschappen zo goed als mogelijk behoudt. Bovendien worden deze welbepaalde eigenschappen in bouwkundige toepassingen steeds afgetoetst aan een gestelde eis, alvorens te kunnen spreken van een duurzaam object. Een gehaakte muts die gedurende 10 jaar warm en comfortabel blijft, is 'durable'. Het is moeilijk en niet nodig om te definiëren hoe warm en hoe comfortabel ze is. Een dragende buitenmuur moet dan weer voldoende isoleren, en stevig en water- en winddicht zijn, en dit gedurende tientallen jaren. Maar hier zijn alle eigenschappen in principe te kwantificeren en af te toetsen aan eisen. Alleen wanneer de muur aan al deze zaken heeft voldaan, is hij pas 'durable'. Duurzaamheid als som van 2 delen gaat dus zowel over de impact van een object op zijn omgeving, als over de eigenschappen van het object zelf, waarbij beiden worden bekeken op lange termijn.

Is vernaculaire architectuur dan ook 'durable'? Dat is een heel andere vraag, en één waarop een éénduidig antwoord eigenlijk onmogelijk is. Enerzijds kan men opmerken dat het 'meegaan in de tijd' nogal verschilt tussen verschillende gebouwcomponenten, zoals het dat vandaag ook nog doet. Jozef Weyns documenteerde in de jaren '60 eiken vakwerkstructuren die naar zijn oordeel waren opgericht in de late 17e eeuw³⁶. Dat is ook vandaag nog een bijzonder lange levensduur voor een draagstructuur. Maar anderzijds moesten de lemen muren van diezelfde hoeve wel minstens één maal per jaar opnieuw worden gewit³⁷, om te vermijden dat de regen ze zou wegspoelen. 'Durability' is ook in vernaculaire architectuur dus bijzonder afhankelijk van component tot component. Anderzijds is de duurzaamheid van een gebouwcomponent volgens de gebruikte definitie ook afhankelijk van bepaalde eisen. In sommige gevallen is het weinig relevant om eigenschappen van vernaculaire gebouwcomponenten te toetsen aan moderne eisen. Dat de oude leemwand niet goed scoort op vlak van robuustheid en isolatiekwaliteit – om maar 2 voorbeelden te geven – in vergelijking met een moderne spouwmuur is redelijk evident, maar op zich een nutteloze vergelijking. 'Durability' is dus deels een tijds- en plaatsgebonden concept. Overigens kan ook worden geargumenteed dat vernaculaire bouwwijzen, die zich gedurende eeuwen traag hebben ontwikkeld vanuit een logica eigen aan de bewoners, in alle waarschijnlijkheid geen verschrikkelijk slechte prestaties aan te dag legden, zelfs niet naar huidige normen. Het nastreven van een comfortabel binnenklimaat is immers geen louter moderne bekommernis. Zo kan worden aangevoerd dat het kortzichtig zou zijn en zelfs zou getuigen van een neerbuigende houding tegenover de pre-industriële bouw, om aan te nemen dat oude gebouwen geenszins in staat waren wind, water en koude buiten te houden.

in de hele levenscyclus van een bepaald product, en bevat de volgende aandelen: energieverbruik voor de ontginning en verwerking van grondstoffen, fabricage, transport en distributie, montage en constructie, en afbraak en recyclage.

32. Het 'cradle to cradle' concept, letterlijk vertaald als 'wiege tot wiege', werd in 2002 geïntroduceerd door William McDonough en Michael Braungart. Dit concept duidt op bouwmaterialen die door hun intrinsieke eigenschappen oneindig kunnen worden hergebruikt of op het einde van hun levenscyclus als basis kunnen dienen voor een nieuwe hoeveelheid van hetzelfde materiaal. Denk aan aardebouw of houtbouw, waarin de aarde en het hout niet zijn gemodificeerd.

33. Fernandes, Mateus, en Bragança 2013

34. Letizia Dipasquale en Saverio Mecca 2014, pp 41,44

35. Wilkinson 1973

36. Weyns 1967, p6. Weyns dateerde de hoeve aan de hand van het in de moerbalk ingekerfde jaartal '1697'. Het is mogelijk dus mogelijk dat deze balk zelf uit nog vroegere tijden dateerde.

37. Het 'witten' van muren wordt toegelicht in het onderdeel 'De wandinvulling'.

Wat kunnen we dus leren uit vernaculaire architectuur? Dat deze vraag überhaupt een zinnige vraag is om te stellen werd geargumenteed door de noties van vernaculaire architectuur en duurzaamheid uit te klaren. Er werd aangetoond hoe vernaculaire architectuur kan worden beschouwd als een stichtend voorbeeld voor een aantal aspecten van de parapluterm die duurzaamheid is. Deze thesis kadert in een algemene tendens binnen de bouwwereld, waarin een verschuiving zit op wat van belang wordt geacht. Langzaam maar zeker werd tijdens de laatste decennia algemeen erkend dat het bouwen bij uitstek een menselijke activiteit is die de planeet zwaar belast, en dat het beperken van deze milieu impact van primordiaal belang is. Een toekomstig gebouw wordt dus maar beter evenzeer geschat naar de mate waarin zij beantwoordt aan een 'vernaculaire duurzaamheid', zonder haar eigentijdse context te negeren.

Om het thesisonderzoek af te bakenen, werd er voor gekozen om alleen buitenwandopbouwen te evalueren. Wat kunnen we dus leren uit vernaculaire wandopbouwen? Deze eenvoudige onderzoeksvraag lijkt echter voorbij te gaan aan het feit dat vandaag al een uitgebreid gamma aan geherwaardeerde oude wandtechnieken bestaat. Overigens is de afbakening tussen 'oude' en 'moderne' wandopbouwen in feite bijzonder artificieel, als men zich bedenkt dat beide wanden vandaag de dag worden gebouwd. Het moge echter duidelijk zijn dat wanneer een bouwtechniek in deze scriptie als 'modern' wordt geclassificeerd, dat gebaseerd is op gebruikte materialen en de gerelateerde productieprocessen, alsook op de uitvoeringstechniek. Beiden mogen pas vanaf de Industriële Revolutie werkelijk zijn doorgebroken, dan is de bouwtechniek modern – denk aan (gewapend) beton, staal, kunststoffen, lijmen, gelamineerd hout,... en als randgeval: baksteen. Alles wat hier niet aan voldoet, wordt beschouwd als 'oud' of daarvan afgeleid. Maar het blijft een feit dat de kennis uit oude technieken nog steeds – of opnieuw – in mindere of meerdere mate wordt ingezet in de bouw. Zo ontwierp Fathy in de jaren '40 New Gourna volledig uit ongebakken leemstenen, werkt de internationale onderzoeksgroep CRAterre³⁸ sinds de jaren '70 aan de erkenning van aarde als deugdelijk en relevant bouw materiaal, en bezocht ik de laatste maanden 4 woonsten die werden opgebouwd uit een houtskelet en aarde, of uit andere bio- en geobaseerde producten. Kortom, de vraag over wat we vandaag kunnen leren uit vernaculaire wanden herleiden tot een zoektocht naar nieuwe technieken die gebaseerd zijn op oude technieken, zou zinloos zijn binnen het bereik van een masterscriptie. De kans is gewoon groot dat er toch niets nieuws uit de bus zou komen, want zoals gezegd, deze nieuwe technieken bestaan immers al.

De vraag verandert dus nog maar eens. Het gaat niet meer over wat we kunnen leren uit vernaculaire architectuur maar wel over wat we al aan het leren zijn. In het pré-industriële tijdperk, waarin niemand zich bewust was over de menselijke impact op de planeet, werd op een veel meer 'sustainable' manier gebouwd dan nu. Vandaag wordt aardebouw, dat geschoeid is op de leest van vernaculaire architectuur, dan ook gepresenteerd als een duurzaam alternatief op klassiek moderne bouwmethodes. Ergens zit er echter een spanning op het presenteren van vernaculaire technieken als een duurzame 'way to go', wanneer deze oorspronkelijk niet vanuit duurzaamheidsoverwegingen werden ontwikkeld. Het begrip duurzaamheid riskeert op deze manier sterk te worden verengd tot een uitgekleden versie van 'sustainability'. Deze vaststelling heeft geleid tot het definiëren van de uiteindelijke onderzoeksvraag van deze masterscriptie.

38. CRAterre, of het Centre international de la construction en terre, is een onderzoeksgroep van de Ecole Nationale Supérieure d'Architecture in Grenoble, en voert onderzoek naar alle vormen van aardebouw in historische en hedendaagse toepassingen. Het Pleistocène is een geologisch tijdvak dat duurde van 2,58 miljoen jaar tot 11,7 duizend jaar geleden.

Onderzoeksvraag

Wat is het werkelijk potentieel van oorspronkelijk pré-industriële bouwtechnieken, gebaseerd op aarde en organische materialen, voor het ontwerp en de realisatie van hedendaagse, duurzame wandopbouwen in de Lage Landen?

Zoals al aangehaald is er iets artificieels aan de afbakening tussen 'oude' en 'moderne' wandopbouwen. Er wordt doorheen de scriptie een opdeling gemaakt tussen afgeleide bouwtechnieken waarvan de oorspronkelijke technieken courant waren vóór de Industriële Revolutie en die dat daarna werden.

Het pré – industriële tijdperk is een westerse tijdsaanduiding die algemeen verwijst naar de samenleving vóór de 19e eeuw. Pré – industriële bouwtechnieken zijn bouwtechnieken waarin een minimum aan gemechaniseerde of chemische processen aan te pas komen, en handenarbeid centraal staat. Deze technieken werden aangewend vóór de doorbraak van gebakken klei (midden 19e eeuw) en cement (midden 20e eeuw) als courante bouwstoffen. Hedendaagse toepassingen worden beschouwd als dat wat vandaag én vanaf vandaag wordt gebouwd.

Deze scriptie gaat in op aardebouw³⁹. Ondanks de naam wordt daarin meer dan één materiaal gebruikt. De 3 materiaalgroepen waaruit grondstoffen worden geput voor aardebouw zijn: a) mineralen – 'aarde' en minerale toeslagstoffen, b) organische stoffen – plantaardige en dierlijke vezels en toeslagstoffen en c) hout – wat in se ook een organische stof is maar als aparte materiaalklasse wordt gerekend. Andere pré-industriële materialen, zoals natuursteen en gebakken steen, worden niet beschouwd.

Er werd eerder beschreven welke invulling deze scriptie geeft aan het containerbegrip 'duurzaamheid'. Enerzijds houdt dit een zekere performantie en robuustheid in van een gebouwelement, en anderzijds dient de milieutechnische impact van dat element tot een minimum te worden gereduceerd.

De Lage Landen omvatten het Noordwest-Europese kustgebied dat de laagvlakte vormt van de Schelde-, Maas- en Rijndelta, en overeenkomt met het grondgebied van België, Nederland en Luxemburg en de provincies Frans-Vlaanderen en Oost-Friesland. Volgens de klimaatclassificatie van Köppen wordt deze zone gekenmerkt door een gematigd klimaat zonder droog seizoen en met een gematigde zomer. Een inschatting van het klimaat is uiteraard niet onbelangrijk om de duurzaamheid van een gebouwelement te kunnen evalueren. Algemene claims die niet geografisch worden gesitueerd zullen in deze scriptie steeds betrekking hebben op de Lage Landen.

[...] potentieel van oorspronkelijk pré-industriële bouwtechnieken, gebaseerd op aarde [...]

[...] potentieel van oorspronkelijk pré-industriële bouwtechnieken, gebaseerd op aarde en organische materialen, voor het ontwerp en de realisatie van hedendaagse [...]

[...] pré-industriële bouwtechnieken, gebaseerd op aarde en organische materialen, voor het ontwerp en de realisatie [...]

[...] realisatie van hedendaagse, duurzame wandopbouwen in de Lage Landen?

[...] gebaseerd op aarde en organische materialen, voor het ontwerp en de realisatie van hedendaagse, duurzame wandopbouwen in de Lage Landen?

Methodiek

Het scriptieonderzoek startte in september 2021 vanuit de observatie en attitude, beiden te danken aan de voorgaande 4 jaar opleiding, dat de ecologische impact van de bouwwereld dringend moet worden gereduceerd en vanuit de bijna romantische overtuiging dat architecten van vandaag en morgen ongetwijfeld wel iets kunnen leren uit 'hoe het vroeger werd gedaan'. Om vanuit deze weinig concrete gedachten een bouwtechnische masterscriptie te kunnen schrijven, moest eerst een onderzoeksdomen worden afgebakend en een onderzoeksvraag worden opgesteld. En daarom startte het onderzoek voor de scriptie met het opstellen van een literatuurlijst. Deze lijst werd aanvankelijk opgebouwd met werken over Belgische volkskunde⁴⁰ en later met werken over internationale vernaculaire aardebouw. Aangezien de opzet van de scriptie is een blik op het heden en de toekomst te werpen, werd al snel begonnen met het raadplegen van meer recente publicaties over hedendaagse geo- en biogebaseerde bouwtechnieken, en de milieupact van de gebouwindustrie in het algemeen.

De tweedeling tussen 'vroeger en nu' was niet enkel een gegeven in de bronnenlijst maar vormt het uitgangspunt van de scriptie. Om een inschatting te maken van het potentieel van oorspronkelijk pré-industriële bouwtechnieken voor hedendaagse duurzame wanden, wordt de scriptie verdeeld in 2 hoofddelen. Het eerste deel bestaat uit een historische analyse van de meest toegepaste vernaculaire aardebouwtechnieken voor het bouwen van aarde, en is gebaseerd op een literatuurstudie. In dit deel wordt een beeld geschetst van de economie en de ecologie achter bepaalde vormen van vernaculaire aardebouw, teneinde de overeenkomsten en verschillen met de hedendaagse context te begrijpen. In het tweede deel van de scriptie wordt een andere structuur gevolgd. Er wordt geen overzicht gegeven maar er worden specifieke voorbeelden van hedendaagse geo- en biogebaseerde wanden gedocumenteerd. 4 Belgische case studies van buitenmuren in residentiële laagbouw worden zowel op een kwalitatieve manier (materiaalstromen en constructietechnieken), als op een kwantitatieve manier ('embodied carbon' berekening) onderzocht. Het doel van de casestudies is een selectieve beoordeling te maken van hun duurzaamheid, en de resultaten zowel onderling als met een gekozen referentiemuur te vergelijken. Door de resultaten van beide delen in de scriptie naast elkaar te leggen wordt het mogelijk om aan de hand van een buitenwandconstructie het begrip 'duurzaamheid' te contextualiseren.

Dit onderzoek gaat over een manier van bouwen die ooit alomtegenwoordig was maar nu in de marge van het West-Europese constructieveld opereert. Dit geldt zowel voor de gebouwindustrie zelf, als voor de academische wereld. Aan de vakgroep Architectuur & Stedenbouw van Universiteit Gent is er dan ook nog maar een beperkte expertise opgebouwd omtrent het gebruik van bio- en geogebaseerde materialen⁴¹. Deze masterscriptie tracht dan ook geen fundamenteel onderzoek te voeren naar een specifiek aspect binnen een grondig ontwikkeld onderzoeksveld. De opzet van de thesis kan eerder worden beschreven als een exploratieve conceptualisatie van de term 'duurzaamheid', en situeert zich daarmee met momenten dan ook tussen de velden van bouwtechniek en architectuurtheorie. De conceptualisatie van 'duurzaamheid' is dan ook een moeilijke oefening maar één die waardevol is, doordat de term vandaag centraal staat in de bouwwereld en geo- en biogebaseerde constructie er haar legitimiteit als academische discipline aan ontleent.

39. In de scriptie zal de term 'aardebouw' stevast worden verkozen boven 'leembouw', wat mogelijk een meer courante benaming is voor deze soort van bouwen. Leem is echter niet alleen een grondsoort maar ook een Nederlands synoniem voor 'silt', een sedimentklasse waarvan de deeltjes een grootte hebben tussen de 2 en 63 micrometer. Bijgevolg kan de naam 'leembouw' de foute indruk geven dat alleen deze gronddeeltjes worden gebruikt. De naam 'aardebouw' is minder precies en daarom – in dit geval – correcter.

40. Volkskunde is de wetenschap die handelt over de 'cultuur van het dagelijkse leven'. De figuren van Jozef Weyns en Clemens V. Trefois behoren tot de auteurs die het meest werden geraadpleegd.

41. Er is echter een kentering merkbaar, door onderzoeksprojecten zoals 'To bio or not to bio' van de onderzoeksgroep Bouwfysica.

Deel 1: Een bouwtechnische bloemlezing van de historische wand

Uit de literatuurstudie is om te beginnen gebleken hoe moeilijk archeologen en historici het vinden om de constructie van de wand te schetsen als een doorlopende ontwikkeling. De aard van de prehistorische wand, opgebouwd met aarde en organische materialen, heeft als gevolg dat er na lange tijd nog maar zeer weinig materiaal overblijft dat kan worden geanalyseerd. Tussen de beperkte gegevens waarover archeologen kunnen beschikken, zijn 'de verschillen groter dan de overeenkomsten'⁴². Bovendien zijn historische bouwtechnische ontwikkelingen over een bepaald territorium ook zelden te verklaren vanuit een beperkt aantal logica's. Het verhaal van de evolutie in wandopbouwen kan niet worden geschetst als een proces waarbij het ene voor een welbepaalde reden door het andere wordt afgelost. Daarom wordt in dit deel dan ook niet geambieerd een sluitend overzicht te presenteren. Bepaalde woordkeus of formuleringen mogen dan ook niet de indruk geven dat er op een bepaald punt in het verleden alleen sprake was van de desbetreffende wandopbouw. Zoals in haar domeinen het geval is, is ook de geschiedenis van de bouwtechniek een verzameling van naast en door elkaar lopende verhalen. Aan de hand van de onderzoeken van Trefois⁴³, Schols⁴⁴, Goedseels en Vanhaute⁴⁵, Voskuil⁴⁶, Eggen⁴⁷ en Harris⁴⁸ wordt in dit onderdeel een min of meer chronologische oplijsting gemaakt van courante pre-industriële aardebouw wanden.

In sommige gevallen werden technische termen gebruikt voor het aanduiden van onderdelen in de vakwerkwand. Indien niet anders vermeld, zijn deze termen ontleend aan (Stichting Historisch boerderij-onderzoek Arnhem 1973).

- 42. Voskuil 1979, p11
- 43. Trefois 1979a en Trefois 1979b
- 44. Schols 1958
- 45. Goedseels en Vanhaute 1979
- 46. Voskuil 1979
- 47. Eggen 1989
- 48. Harris 2003

De komwoning zonder wand

Van de jager-voedselverzamelaars, die duizenden jaren geleden tijdens het Pleistoceen⁴⁹ doorheen de Lage Landen foerageerden, zijn tot op vandaag alleen vage woonsporen achtergebleven. Door archeologische vondsten van uitgravingen lijkt het waarschijnlijk aan te nemen⁵⁰ dat deze vroegmoderne mensen beschutting optrokken onder de vorm van ronde of ovale 'hutkommen' van enkele meters in diameter, en mogelijk afgedekt met een vlechtwerk waarop dierenhuiden waren bevestigd. In deze eerste vorm van huisvesting werden de buitenmuren rechtstreeks gevormd door de grond, die vermoedelijk werd aangestampt en werd uitgedroogd door het vuur in de centrale stookplaats. De put werd met de hand en allicht ook met behulp van rudimentaire werktuigen, uit beenderen, hout en later uit steen, uitgegraven en kon volgens Trefois tot 1,5 a 2m diep zijn⁵¹. Het dak vormde het enigste bovengrondse element. Naast dierenhuiden werd dit dak ook ondoordringbaar gemaakt met materialen die de nomade overal terug vond: plantenstengels, de aarde die hij uitgroef en bladeren. Deze wandloze constructie was volgens Trefois de oervorm waaruit zich later een meer volmaakte komwoning zou ontwikkelen.

Het is niet duidelijk waarom deze woonvorm werd verkozen boven een bovengrondse woning. De komwoning bood immers weinig bescherming tegen organismen en regenwaterinfiltratie doorheen de bodem. Bovendien kan de arbeid die nodig was om een komwoning uit te graven nauwelijks hebben ondergedaan aan het werk dat werd geleverd om bovengrondse constructies op te richten. Aan een gebrek aan kennis kan het ook niet liggen, er werd immers ook al gebruik gemaakt van een bovengronds vlechtwerk. De eerste komhutbewoners moeten de voordelen van ondergronds bouwen al hebben erkend. Het meest voor de hand liggende voordeel is dat de aarde vanaf een diepte van 3 meter op een ongeveer constante temperatuur blijft. De bodem dempt de extreme temperatuurschommelingen van de buitenlucht tussen dag en nacht en tussen seizoenen, en hij beschermt tevens tegen warmteverliezen of -winsten door de wind. In deze zin zou de grond als 'buitenmuur' beter in staat geweest zijn een comfortabel binnenklimaat te realiseren dan de toenmalig zelf geconstrueerde wanden.

Hoewel de mens na het Pleistoceen sedentair werd en veelal andere woningen begon te bouwen, bleef toch de komwoning tot in het Frankisch – Merovingische tijdperk⁵² ononderbroken in gebruik. Bij de meer 'volmaakte' variant die in landbouwgemeenschappen ontstond werd voor het eerst iets geïntroduceerd wat leek op een bovengrondse muur, die overigens nog steeds een geheel vormde met het dak. Trefois (1979) heeft het over 'wanden uit zware boomtakken, die met lichtere takken zijn verbonden. Soms bestond de wand uit 2 tot driemaal kringvormig omheen de woonkern in elkaar verwerkte takken en wijmen⁵³, die langs boven bijenkorfvormig waren samengevlochten⁵⁴. De bovengrondse constructie, die voorheen alleen het dak uitmaakte, werd nu ook deels muur. In België werden resten van zogenaamde 'fonds de cabane' ontdekt in onder meer Varsenare, Kontich en Gent, waarvan de jongste dateren uit de La-Tène periode⁵⁵.

49. Het Pleistoceen is een geologisch tijdvak dat duurde van 2,58 miljoen jaar tot 11,7 duizend jaar geleden.

50. Voskuil 1979

51. Trefois 1979, p18

52. De Merovingische dynastie heerste over het Frankische rijk vanaf midden 5e eeuw tot midden 8e eeuw. Het Frankische rijk strekte zich uit over het grootste deel van huidig West-Europa.

53. Wijmen = wilgentakken.

54. Trefois 1979, p19

55. De La-Tène periode is een periode in de Europese ijzertijd die duurde van 450 v.C. tot de 1e eeuw v.C.

Vlechtwerk en de eerste staande wanden

De West-Europese landbouw werd ongeveer 4500 jaar vóór Christus geboren, wat rechtstreeks leidde tot permanente nederzettingvormen in hoofdzakelijk vruchtbare streken, gekenmerkt door leemondergronden⁵⁶. Deze nederzettingen van landbouwers uit de bandkeramische cultuur⁵⁷ hebben duidelijkere sporen achtergelaten in de ondergrond. Er wordt in de literatuur aangenomen, en dit lijkt inderdaad voor de hand liggend, dat wanneer de mens sedentair werd – of tenminste, zolang de bodem vruchtbaar bleef zonder bemesting, daarna werden andere oorden opgezocht – hij steeds meer gesofisticeerde bouwmethoden ontwikkelde, die een langer verblijf mogelijk maakten. Uit opgravingen in de jaren '50 en '60 in Nederlands-Limburg, bleek dat landbouwers tussen 4500 v.C. en 4000 v.C. in huizen met een rechthoekig grondplan woonden. De woningen van een bepaalde gemeenschap lagen niet volgens een bepaald plan gegroepeerd, maar lagen wel bijna allemaal in de lengterichting volgens noordwest-zuidoost-richting georiënteerd. Het zadeldak werd gedragen door een rij kolommen onder de nok en 2 rijen kolommen aan weerskanten (zie Fig.1), maar ook door een rij lichtere palen rondom. Deze lichte palen maakten ook het geraamte uit van de buitenwand. Aangezien naast de wand steeds een greppel werd teruggevonden, betekent dit volgens Voskuil dat men leemgrond uitgroef om daarmee vlechtwerk te besmeren dat tussen de paaltjes werd gevlochten⁵⁸.

Opvallend is dat bij dezelfde woningen in enkele gevallen sporen van 2 totaal verschillende buitenwanden werden aangetroffen. Bij een aantal huizen vond men aan de noordwestzijde – de kopse gevel – geen afzonderlijke gaten van lichte palen, maar een enkele doorlopende sleuf. Dit wijst erop dat de buitenmuur op deze plaatsen volledig was opgetrokken uit rechtop in de grond stekende gekleefde stukken boomstam. De opvullende stukken hadden een rechthoekige doorsnede, en net zoals bij de wanden uit vlechtwerk hadden de dragende stijlen in deze huizen steeds een driehoekige doorsnede. Voskuil wijst erop dat het maken van een volledig houten wand in de bandkeramische periode meer werk met zich meebracht dan het maken van een wand van vlechtwerk, wat waarschijnlijk de reden is waarom deze wandopbouw alleen voor de kopse gevel werd aangewend. Maar dat dit op deze manier gebeurde, laat wel zien dat de landbouwer zich toen al bewust was van de oriëntatie van zijn woning en de windrichting waaruit de meeste regen valt. De gevlochten buitenwanden lagen aan de noordoostelijke en zuidwestelijke kant, en waren met hun beperkte hoogte beter beschermd door het uitkragend zadeldak tegen regen en wind, die voor 49% uit het zuiden tot het westen blaast. De kopse gevel aan de noordwestkant had deze bescherming echter niet, terwijl deze kant ook 27% van de tijd wordt blootgesteld aan de wind⁵⁹. Een theorie is dus dat bewust gebruik werd gemaakt van de houten opbouw, die beter bestand was tegen de weersinvloeden dan de toenmalige aarde- en vlechtwerkwand, maar ook dat de houten wand even performant werd gemaakt als de dichte aardewand. Daarom lijkt het aannemelijk dat ook in de kopse gevel gebruik werd gemaakt van takken, twijgen en gras in combinatie met aarde, om de spleten tussen de gekleefde stammen te dichten.

In ieder geval was de houten stammenconstructie een volwaardiger alternatief om een buitenwand mee op te richten. Toch lijkt er in de vroege geschiedenis

56. Goedseels en Vanhaute 1979, p28

57. De bandkeramiek is een neolithische Europese cultuur (circa 11000 v.C. tot 3000 v.C.), die in West-Europa het sterkst vertegenwoordigd werd in de Rijndelta. Ze wordt bandkeramische cultuur genoemd omdat in die periode de oogst werd bewaard in aardewerk met verschillende bolle vormen en typische 'banden-versieringen' (Goedseels en Vanhaute 1979, p24).

58. Voskuil 1979, p8

59. Deze gegevens gelden voor het jaar 2021. Er kan echter worden aangenomen dat het weer 7000 jaar geleden gelijkaardige patronen vertoonde ('KMI - Parameters' z.d.).

een duidelijke voorkeur te hebben bestaan voor de vlechtwerkwand. In de kuststrook was de schaarste aan hoogwaardig constructiehout hiervoor allicht de hoofdreden, maar voor inlandse zandgronden gaat deze verklaring waarschijnlijk niet op. Voskuil zoekt hier een verklaring in constructieve of arbeids-economische voordelen van de vlechtwerkwand⁶⁰. Aangezien men om de paar oogsten op zoek moest naar nieuwe landbouwgrond, lijkt de robuustheid van een houten wand in vele gevallen niet op te wegen tegen de eenvoud waarmee een aardemuur kan worden opgericht. Het feit is dat binnen de eerste landbouwsamenlevingen verschillende constructies van de vlechtwerkwand werden toegepast. Om te beginnen werd de methode toegepast waarvan hiervoor sprake was, waarbij paaltjes de dakvoet droegen. Volgens Voskuil bevond het vlechtwerk zich achter deze paaltjes, die als het ware fungeerden als uitwendig skelet. Bij een andere techniek werd gebruik gemaakt van 2 rijen paaltjes, ongeveer 30 cm van elkaar verwijderd. Tegen elk van deze rijen paaltjes werd langs binnen een vlechtwerkwand bevestigd, mogelijk met een vulling van riet of van stro, en afgedekt met een laag leem. Het vlechtwerk fungeerde hier als een verloren bekisting.

In Ezinge, in de huidige Nederlandse provincie Groningen, werden begin 20e eeuw verschillende nederzettingen blootgelegd die dateerden uit de periode tussen ongeveer 350 v.C. en 400 n.C.⁶¹. In een strijd met de zee, die over een periode van honderden jaren de nederzettingen verschillende keren overspoelde, werden nieuwe woningen bovenop oude gebouwd nadat de zee zich had teruggetrokken. Eén zogenaamde 'woonlaag', die dateerde uit de IJzertijd – 3e tot 4e eeuw v.C. – gaf inkijk in een nieuw soort van wandopbouw, waaruit het vernuft van de toenmalige Friezen blijkt. 'Waarschijnlijk,' zo redeneren Goedseels en Vanhaute, 'hadden ze al begrepen dat een muur 2 functies – namelijk een functie van dragend element en een functie van scheidingselement – kan vervullen, en dat er materiaal bespaard wordt wanneer die 2 functies door verschillende systemen worden vervuld'⁶². Rondom rond de buitenwand van de rechthoekige hoeve werden restanten van paalgaten teruggevonden, op een afstand van 25-40 cm van de wand, en met een onderlinge tussenruimte van 1-2 meter. Er zijn sterke aanwijzingen dat deze palen recht gestaan hebben, en dus niet als functie hadden om de buitenwand te schoren tegen de spatkrachten van het dak. Voskuil voert aan dat de palen dienden om het volledige gewicht van de dakvoetplaat⁶³ te dragen. Waar deze elementen door de bandkeramieker nog werden geïntegreerd in de buitenwand, kwamen ze hier in deze constructie volledig los van. De lage vlechtwerkwand had nog slechts een scheidende en isolerende functie te vervullen, maar was aan haar bovenkant volgens Trier wel vervlochten met de dakopbouw⁶⁴.

Er zijn in de literatuur een aantal mogelijke redenen aangehaald voor dit ontdebellen van de dragende en scheidende functie. Het verlagen van de dakvoet en het laten inspringen van de wand is allicht te wijten aan de klimatologische omstandigheden in het kwelderlandschap⁶⁵, met een hogere neerslagactiviteit in de overgang van de late Bronstijd naar de vroege IJzertijd⁶⁶. Zoals eerder al geschreven werd op deze manier voorkomen dat de regen de klei of leem uit het vlechtwerk spoelde. De vraag blijft echter waarom de dakvoet niet kon worden verlaagd zonder dat de vlechtwerkwand haar dragende functie verloor. Voskuil voert hiervoor een materiaal

60. Voskuil 1979, p10

61. Ibid., p12

62. Goedseel en Vanhaute 1979, p29

63. Een 'plaat' duidt in de context van houtbouw op een lineair horizontaal dragend element, waarvan de breedte groter is dan (in extreme gevallen gelijk is aan) de hoogte. De dakvoetplaat bevindt zich aan de onderkant van het dak, hier worden de daksparen aan gebonden of bevestigd met nagels.

64. Trier 1969

65. Kwelders zijn vlakten die worden gevormd door de constante sedimentatie van zeeklei door de getijdenwerking. Plantengroei bevordert de sedimentatie en zo slijbt de kwelder langzaam op.

66. Voskuil, p12

technische verklaring aan. Dat de vlechtwerkwanden tot soms een meter hoogte bewaard gebleven zijn in de mest- en kleilagen, heeft toegelaten de gebruikte houtsoorten te analyseren. Voor het vlechtwerk in de kuststreken werd voornamelijk gebruik gemaakt van es en els en in mindere mate van wilg, vuilboom, berk en hazelaar. Houtsoorten zoals eik werden slechts uitzonderlijk gebruikt, en hoogwaardig hout was steeds bestemd voor de zware palen die binnenshuis het dak droegen. Wanneer men dan bedenkt, zo argumenteert Voskuil, dat het vlechtwerk uit dit lichte hout onmogelijk muurvast kan hebben gezeten in de modderige bodem, zocht men waarschijnlijk naar een systeem waarbij het taaie, maar zachte en buigzame hout zo weinig mogelijk werd belast, om te vermijden dat de wanden onder druk zouden te komen staan door het gewicht van het dak enerzijds en de reactie van het gebouw op de windkrachten anderzijds. Er moest immers worden vermeden dat het materiaal waarmee het vlechtwerk werd dichtgesmeerd, klei of leem, of koeienmest, zou worden samengedrukt nadat het was uitgedroogd waardoor scheuren zouden ontstaan en het zou afbrokkelen⁶⁷. Zo ook kan de wand niet aan de onderkant van het dak zijn vervlochten, omdat hij dan alle bewegingen door de wind moest ondergaan. Natuurlijk kan hij wel tot vlak ertegen zijn opgebouwd. Het was dus de afhankelijkheid van materialen die in de nabije omgeving voldoende te vinden en gemakkelijk te bewerken waren, die de landbouwer ertoe dwong zijn wandsysteem te herdenken. Door de dakconstructie op deze manier op te bouwen, zorgde men ervoor dat men met minder hoogwaardige houtsoorten hetzelfde doel kon bereiken, namelijk het afschermen van de binnenomgeving.

Tacitus⁶⁸ schreef in zijn 'Germania'⁶⁹ de volgende passage: 'de Germaanse volksstammen bewonen geen aan mekaar gerijde huizen. Ieder laat rond zijn huis een open ruimte; voor alle doeleinden gebruiken zij onbehouwen timmerhout, zonder voorkomen of smaak. Bepaalde delen bestrijken zij zorgvuldig met zulke zuivere en glanzende kleiaarde, dat het de indruk geeft van schilderwerk en omlijstingen in kleuren'⁷⁰. De precieze opbouw van de vlechtwerkinvulling werd hiervoor al verschillende keren aangeraakt, maar het zou onvolledig zijn om er nu niet dieper op in te gaan. De meest precieze gegevens die Voskuil weergeeft zijn tevens afkomstig van de opgravingen in Ezinge⁷¹. Het geraamte van de vlechtwerkwand bestond uit stokken, tot 5 cm dik – of uit stammetjes die in 2 of in 4 waren gekloofd – die aan een uiteinde waren aangepunt. De stokken werden op afstanden van 20 tot 40 cm van elkaar ingegraven en ingeslagen in de grond. In sommige wanden werden onderaan aan de ingeslagen stokken nog schuine pennen bevestigd, dwars op de wand, die de stevigheid van de constructie moesten verhogen. Deze pennen werden waarschijnlijk vastgemaakt door ze vast te binden met plantenstengels of eventueel met vlas- of hennepkoord⁷², in de hele wandopbouw werd zeker nog nergens gebruik gemaakt van houten of metalen nagels. Vervolgens werden duimdikke takken, van de eerder vermelde lichte en meer flexibele boomsoorten, tussen de ingeslagen staken gevlochten, die erboven steeds tegengesteld aan degene eronder. Waarschijnlijk werden deze twijgen met een stok of een ander gereedschap naar onder geslagen zodat men een zo dicht mogelijk vlechtwerk verkreeg. De wanden in Ezinge waren ingegraven in de grond tot op een diepte van 40 cm (zie Fig.3). Voskuil suggereert dat dit werd gedaan om opvriezen te

67. Voskuil 1979, p14

68. Publius Cornelius Tacitus (56 – ca. 120) was een Romeinse redenaar, schrijver en historicus. Hij is bekend van zijn werken; de 'Germania', de 'Historiae' en de 'Annales' ('Tacitus | Roman Historian | Britannica' z.d.).

69. Voluit: 'De origine et situ Germanorum'. Deze passage is afkomstig uit (Germania, 2.c.16.2).

70. Trefois 1979, p14

71. Voskuil 1979, p15

72. Suggestie van de auteur.

voorkomen, maar dit is weinig aannemelijk gezien de beperkte diepte en het geringe isolatievermogen van 'naakt' vlechtwerk. Zijn tweede suggestie, dat dit als bescherming tegen knaagdieren diende, lijkt correcter.

Wanneer het vlechtwerk was afgewerkt moest het worden gedicht. Vaak werd hiervoor gebruik gemaakt van de ondergrond⁷³ die ter plekke naast de hoeve werd opgedolven. Op deze manier werden de wanden dan opgevuld met leem – of zelfs kleiachtige grond, maar op deze materialen wordt later uitgebreid ingegaan. Volgens Van Giffen werd er voor huizen in de kuststreken gewoonlijk een ander materiaal gebruikt als dichting, namelijk koemest⁷⁴. 'Koemest', zo stelt Voskuil, is 'vaster van structuur en elastisch dan leem [...] en ook beter bestand tegen de regen'⁷⁵. Wanden die volledig werden gedicht met mest kunnen echter niet de norm zijn geweest. De kleine veestapels zouden de hiervoor nodige hoeveelheden materiaal niet snel genoeg geleverd kunnen hebben en bovendien had men tegen de vroege ijzertijd geleerd akkers te bemesten en was mest aldus een waardevol goed geworden⁷⁶. Mest werd dus waarschijnlijk gebruikt in een mengeling met aarde, waarbij de verhouding van beide afhankelijk moet geweest zijn van de hoeveelheid beschikbare mest, maar ook van loutere gewoontes en bouwcultuur. Wat de mest 'vaster van structuur' en 'beter bestand tegen de regen' maakte, zoals Voskuil beweert, wordt later uiteengezet.

Met de mengeling van ondergrond, mest en vaak ook extra plantaardig materiaal zoals fijngehakt stro werden de wanden aan de buitenzijde en de binnenzijde bestopt of beworpen, zodat ze diep tussen het vlechtwerk drong⁷⁷. Dat de wanden volgens Tacitus een 'zuivere en glanzende' indruk gaven 'van schilderwerk en omlijstingen in kleuren', is een bijzondere overlevering. Uitgedroogde klei- of leemgrond is immers helemaal niet glanzend. Er moet dus aan de Germaanse wanden die Tacitus kon observeren een extra laag zijn aangebracht. Voskuil voert aan dat deze beschrijving aan een kalkoplossing doet denken, die dan ter bescherming van de buitenzijde diende en mogelijk ook de binnenzijde deed oplichten⁷⁸. Trefois wijst erop dat het aanbrengen van 'verfstoffen op een met klei aangestroken wand' het bewijs levert van een volmaakte vlechtwerktechniek, aangezien dit alleen mogelijk is op een stevig en egaal oppervlak. Bovendien stelt hij dat bepleistering langs de binnenzijde van de wand 'door het haardvuur vrij spoedig haar frisheid [zou] hebben verloren', en acht dit dus als minder voorkomend. Op het kalken van wanden wordt later nog ingegaan, maar in ieder geval lijkt er zich tegen begin van de jaartelling al een redelijk complexe wandopbouw te hebben ontwikkeld, met een vlechtwerk als geraamte, een grondmix als vulmateriaal en een kalkpleisterlaag als bescherming.

73. 'Ondergrond' duidt in deze context op een specifieke grondlaag. Deze laag bevindt zich net onder de toplaag, die relatief rijk is aan organische stoffen en humus en, afhankelijk van de locatie, tot op een diepte van 10 a 30 cm gaat. De ondergrond bestaat uit een mengeling van fijne klei-, silt- en zanddeeltjes en bevat een zekere hoeveelheid kleine stenen.

74. Van Giffen 1973

75. Voskuil 1979, p15

76. Goedseels en Vanhaute 1979, p28

77. Voskuil 1979, p15

78. Ibid.

Fig.1:
*Plattegrond van een
bandkeramisch huis uit
Stein, Nederlands-Lim-
burg*

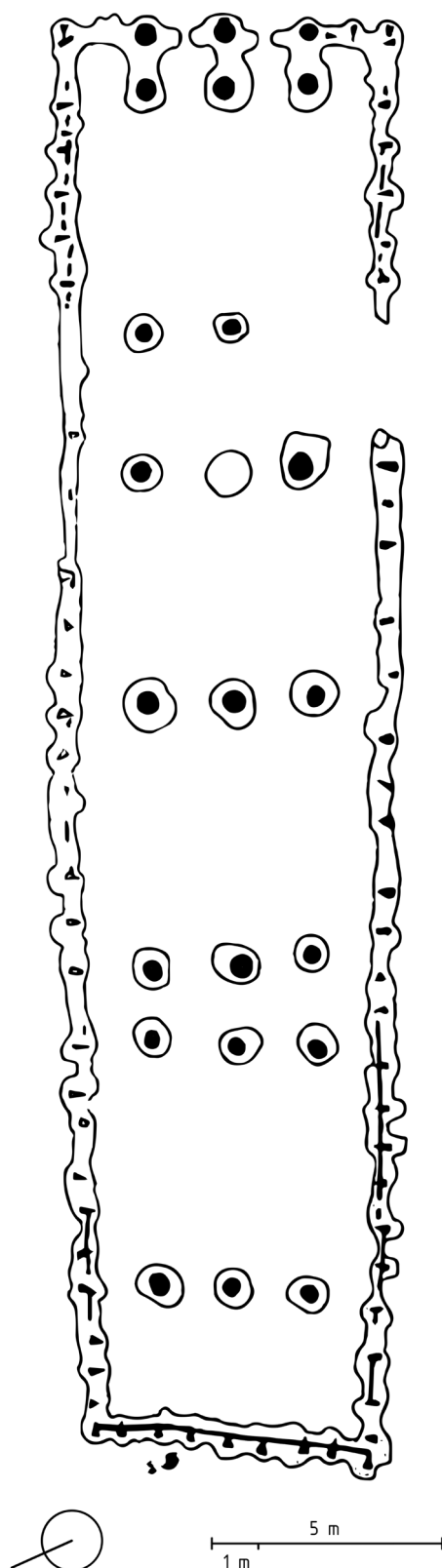




Fig.2:
Reconstructie van een
nederzetting in Ezingen,
3e - 4e eeuw v.C.

Ondanks dat deze reconstructie een beeld geeft van het uiterlijk van dergelijk gebouw, kan worden opgemerkt hoe op deze voorstelling de palen schuin staan getekend. Van Giffen was dan ook een andere mening toegedaan dan Voskuil. Volgens hem had de vlechtwerk wand wel nog steeds als functie de dakvoetplaat te dragen. Aangezien er in deze woningen geen gebint was dat als trekker de spatkrachten van het dak opnam, werden er tegen de buitenkant van het vlechtwerk wallen van graszoden opgeworpen om deze functie te vervullen. De schuin geplaatste palen hadden dan volgens Van Giffen hetzelfde doel en fungeerden als schoeren (Van Giffen 1952).

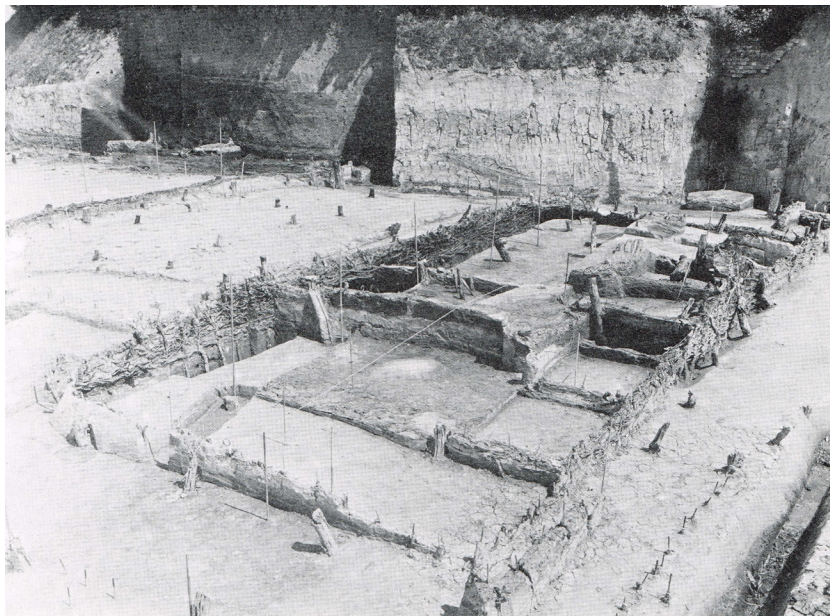


Fig.3:
Een woonfase in de opgravingen van de eerste
terp in Ezingen, 3e - 4e
eeuw v.C.



Fig.4:
Plaggenhut te Onstwedde,
circa 1915

De plaggenwand

Een merkwaardige verschijning waarvan resten zijn teruggevonden die dateren uit de 7e tot 10e eeuw, maar die tevens nog gedocumenteerd werd in 20e eeuw (zie Fig.4), is de plaggenwand. In Noord-Holland en Friesland werden sporen teruggevonden van wanden die volledig waren opgebouwd door het opstapelen van afgestoken graszoden, en gelijkaardige bouwsels kwamen nog voor tijdens het begin van de 20e eeuw in Limburg⁷⁹. Waar de vlechtwerkwand werd gedicht met materiaal uit de ondergrond, werd voor de plaggenwand alleen gebruik gemaakt van de toplaag. Het groot aandeel aan organische stoffen in deze laag, en dan bij uitstek de graswortels en die van andere planten, zorgde voor het verband in en tussen de zoden. Voskuil voert echter aan dat we 'op grond van ervaringen met nog bestaande plaggenwanden weten [...] dat de draagkracht van zo'n wand zeer gering is en dat ze sterk afneemt naarmate de wortels in de zoden [...] verrotten'⁸⁰. Dit zorgde ervoor dat plaggenwanden nooit hoger konden worden gebouwd dan één bouwlaag en de wand niet veel hoger kon zijn dan ze breed was, wat vaak leidde tot muurvoeten van een meter breed. Het dak, dat steeds uit een houten geraamte bestond, werd dan ook vaak niet afgedragen op de aardewand, die dan louter een scheidende functie had. In bepaalde constructies werden langs de binnenkant van de wand 'zwarte palen' in de grond geplaatst die, net zoals dat bij vlechtwerkwanden ook gebruikelijk was, het gewicht van het dak voor hun rekening namen.

De wortels in de plaggen vervulden dus in se dezelfde functie als het vlechtwerk in een vlechtwerkwand, maar waren een veel kortere levensduur beschoren. Hier was immers geen sprake van de duurzame houtsoorten maar werd levendende materie gebruikt als wapening, die na afzienbare tijd begon te rotten. Allicht was vooral de vochtwering problematisch in dergelijke plaggenwanden, gezien de hoge capillariteit van aarde, waardoor grondvocht ongehinderd tot hoog in de wand kon opstijgen. Maar ook regenwater infiltreerde makkelijk in de wand door de porositeit van de plaggen. Dit zorgde ervoor dat de plaggenwand erg vaak vochtig moet hebben gestaan, waarbij haar grote dikte – die noodzakelijk was voor het draagvermogen – het uitdrogen niet kan hebben geholpen. Verder waren dergelijke plaggenwanden weinig performant op het vlak van isolatievermogen⁸¹ en luchtdichtheid⁷⁶. Het enigste wat vóór deze wand kon pleiten, is dat ze gemakkelijk op te richten was met materiaal dat men dan ook bijna letterlijk overal terug kon vinden. Door al deze zaken achten Voskuil en Trefois het waarschijnlijker dat deze constructie een antwoord moet geweest zijn op een plaatselijk gebrek aan hout, of – voor de allerarmsten – een gebrek aan middelen om hout te kunnen aanschaffen, dan dat ze een voorbeeld was van een nieuwe ontwikkeling in de woningbouw. Trefois kent aan de 'armoedige stro- of plaggenwoning', geen andere betekenis [toe] dan die van een noodwoning', of 'voor het onderbrengen van een door oorlogsrampen geteisterde bevolking'⁸².

79. Voskuil 1979, pp 16,106

80. Ibid., p16

81. Bij het penetreren van een materiaal neemt het water de plaats in van de lucht in de poriën. Water geleidt warmte veel beter dan stilstaande lucht ($\lambda_{\text{water}} = 0,060 \text{ w/mK}$, $\lambda_{\text{lucht}} = 0,025 \text{ w/mK}$). Er blijkt een lineair verband te zijn tussen het vochtgehalte en de thermische permeantie van een aarden wand (Vanros 1981, p119).

82. Trefois 1979, pp 34,36

Massieve wanden uit hout

Als buitenbeentje in de lijst van aarde- en hout-gebaseerde wandtechnieken vinden we de massieve houten wand terug, of zoals Trefois ze noemt; de blokbouw⁸³. Deze soort wanden vormt een uitzondering binnen dit onderdeel, louter omdat er niet voldoende aanwijzingen zijn teruggevonden die op een even grondige verspreiding in onze contreien wijzen als bij de andere technieken het geval is. Desalniettemin werden massieve houtwanden ook hier al dan niet sporadisch aangewend, maar zelden voor woningen. Overeenstemmend met de massiviteit van zulke wanden, werden ze eerder ingezet in gebouwen die zich lenen tot een hoge leeftijd; kerken en burchten. Trefois onderscheidt 2 vormen van blokbouw: 'paalwerkbouw', 'stafbouw' of 'staand blokwerk' en horizontaal of 'liggend blokwerk'.

Het paalwerk was volgens Kniffen en Glassie (1986) in de laat-neolithische periode de dominante constructiemethode in de meeste delen van Europa⁸⁴. Voor zover we weten was de paalwerkwand oorspronkelijk – hiervan werden restanten uit de 3e eeuw opgegraven – samengesteld uit parallel naast elkaar in de grond geheide, massieve ofwel gekloofde boomstammen, en had hij zowel een dragende als afsluitende functie. Eerder werd ook al een bandkeramische techniek voor kopse gevels aangehaald, waarin dragende stijlen werden afgewisseld met elementen met rechthoekige doorsnedes⁸⁵. Aangezien de eerste stafbouwwanden rechtstreeks in de grond werden aangezet, valt ook bij deze techniek te verwachten dat de houten elementen gemiddeld een hoger vochtgehalte bezaten dan hun evenwichtsvochtgehalte⁸⁶, wat de kans op aantasting door schimmels en organismen vergrootte en dus de duurzaamheid van de wand niet ten goed kwam. Bij opgravingen in het Nederlandse Poortugaal, net ten zuiden van Rotterdam, werden in de jaren '60 echter voetplaten teruggevonden in een huis uit de 12e eeuw, waarin een gleuf was uitgebeiteld langsheen de bovenkant. Volgens Hoek (1971) wees de desbetreffende sleuf erop dat hier sprake was van een stafbouwwand, waarbij de houten stammen niet in de grond werden aangezet maar op een houten onderregel – of voetplaat – werden bevestigd, door hun uiteinden gepast vorm te geven. De voetplaat werd op zijn beurt aangezet op een muurvoet of 'stoel' van veldstenen (zie Fig.5). Na verloop van tijd had men dus een manier gevonden om het houten deel op te heffen en te vermijden dat het vocht opnam uit de grond. Hoe belangrijk deze stap was in de ontwikkeling van de wand zal ook verder blijken.

Bij de andere massieve houtwand werd de opbouw als het 90° gedraaid. Blokbouw bestond erin stammen te stapelen, waarbij de massa en het eigengewicht – maar niet de treksterkte – van hout instonden voor de stevigheid van de wand. De lengte van de wand was hier typisch beperkt tot de lengte van de te verkrijgen stammen. Of de houten elementen nu volledige stammen met of zonder schors waren, of dikke planken die werden gezaagd in een zaagput, of stammen die in de lengterichting werden gesplit en werden afgewerkt met een 'broad-axe'⁸⁷ of dissel⁸⁸, steeds werd hetzelfde principe van 'inhaken' van de lagen toegepast⁸⁹. De uiteindes van de elementen werden op een zodanige manier vormgegeven dat ze konden worden ingehaakt op een ander element ter hoogte van de hoek tussen 2 wanden. Op deze manier werd vermeden dat delen van de wanden zouden worden uitgeduwd door

83. Trefois 1979, p29

84. Upton en Vlach 1986, p163

85. Deze elementen benoemen als 'planken' zou verkeerdelijk de indruk kunnen geven dat de bandkeramieker al boomstammen bewerkte met een zaag, wat bijna zeker niet het geval was. Een boomstam werd opgedeeld door hem te klieven in de lengterichting.

86. Het evenwichtsvochtgehalte van hout is het vochtgehalte dat bij een bepaalde temperatuur in evenwicht is met de relatieve vochtigheid van de omringende lucht.

87. Een 'broad-axe', letterlijk vertaald als 'breed-bijl', is een bijl met een lange steel en groot bijlblad dat een lange, vrij rechte snede heeft. Deze bijl werd typisch gebruikt om boomstronken te 'houwen', of vormen tot recht bouwhout.

88. Een dissel lijkt wat op een hak, maar is een type bijl waarvan de snede op een rechte hoek tegenover de steel staat. Zo wordt een dissel gebruikt om het oppervlak van een – al dan niet gekloofde – boomstronk te egaliseren.

89. Oliver 2003, p112

het gewicht van de opgestapelde lagen. Voor dit inhaken werden in de loop van de tijd verschillende methodes ontwikkeld (zie Fig.6). De eenvoudigste en wellicht meest toegepaste hiervan was de zadel-inkerving⁹⁰, waarbij elke ronde stam wordt vastgezet in een passende ronde inkeping. Andere, meer complexe methodes, zoals V-, half-duivenstaart- of vol-duivenstaart-inkerving, maakten het ook mogelijk elementen met rechthoekige doorsneden te gebruiken. Van alle variaties doet de halftand-methode het meest denken aan het half lipverband, wat een populaire manier was om platen in vakwerkconstructies aan elkaar vast te zetten, hierop wordt verderop ingegaan. Er moet echter op worden gewezen dat naast de verbindingen die hier werden aangehaald, er nog talrijke andere zijn ontwikkeld⁹¹. De muurvoetplaat van de blokwerkwand, waarop de vloerbalken rustten, werd gewoonlijk gedragen door natuurstenen pijlers of een stenen muurvoet, maar waar deze stenen niet voorhanden waren werden zware stammen gebruikt⁹². Bij deze laatste optie stond de houten wand dus ook volledig in contact met de vochtige bodem. Dit was echter niet even problematisch als in het geval van de in volle grond aangezette paalwerkwand, aangezien het vochttransport in het geval van blokwerk enerzijds niet volgens de vezelrichting van het hout kon gebeuren – door de horizontale stapeling van de elementen – en anderzijds werd afgeremd door de barrières tussen de verschillende lagen. Deze werden vaak gevormd door aanzienlijke spleten tussen de stammen, aangezien het perfect vlak maken van de stronken meestal onmogelijk was. Deze holtes werden noodzakelijkerwijs opgevuld met een mengeling van houtkrullen, steentjes, mos en – jawel – aarde. Deze dichting diende tijdens de levensduur van de blokwerkwand verschillende keren te worden hernieuwd, vermoedelijk één maal per jaar. Volgens Trefois valt 'het toepassen van deze houtconstructie te paralleliseren met bosrijke landschapsbeelden en grote klimatologische temperatuurverschillen'⁹³. Hij haalt vondsten aan uit Zweden, Oostenrijk, maar ook uit de Rhonestreek en het Juragebergte. 'Of het richten van huiswanden met op elkaar gestapelde boomstammen vroeger ook in de Lage Landen toegepast werd' is dan ook twijfelachtig⁹⁴. Maar toch, zo argumenteert Trefois, kan het niet louter toevallig zijn dat verschillende onderdelen in de latere vakwerkbouw in onze contreien bij voorkeur hoeksgewijs werden verbonden, op een gelijkaardige manier als de elementen in het liggend blokwerk.

Beide systemen gebruikten natuurlijk gevoelig meer – en meer kostbare stukken – hout dan het vlechtwerk, maar maakten ook goed gebruik van de isolerende en beschermende eigenschappen van volle houten wanden. Het overvloedig materiaalgebruik leidde echter op zeer veel plaatsen in West-Europa op termijn tot het verdwijnen van de massieve houtwand. Met het aldoor steeds strenger wordend gereguleerd verbruik van 'groot' boshout tijdens de middeleeuwen, ging de belangstelling voor het vakwerk dan ook aanzienlijk vooruit.

90. Letterlijke vertaling van het Engelse 'saddle notch'.

91. De geïnteresseerde lezer wordt doorverwezen naar het essay 'Building in Wood in the Eastern United States: A Time-Place Perspective' (Upton en Vlach 1986, p 159-181).

92. Oliver 2003, p113

93. Trefois 1979b, p61

94. Ibid., p66

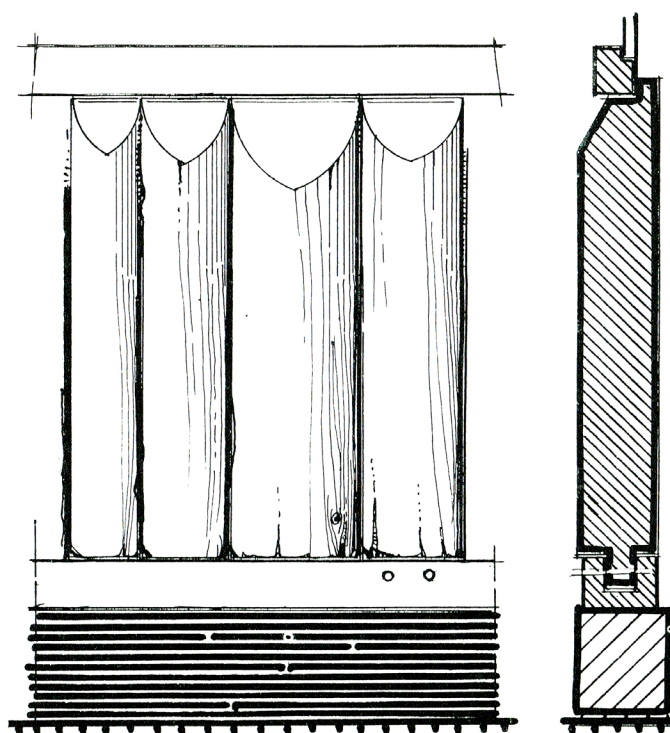


Fig.5:
Paalwerkwand met voet-
plaat

links: aanzicht
rechts: doorsnede

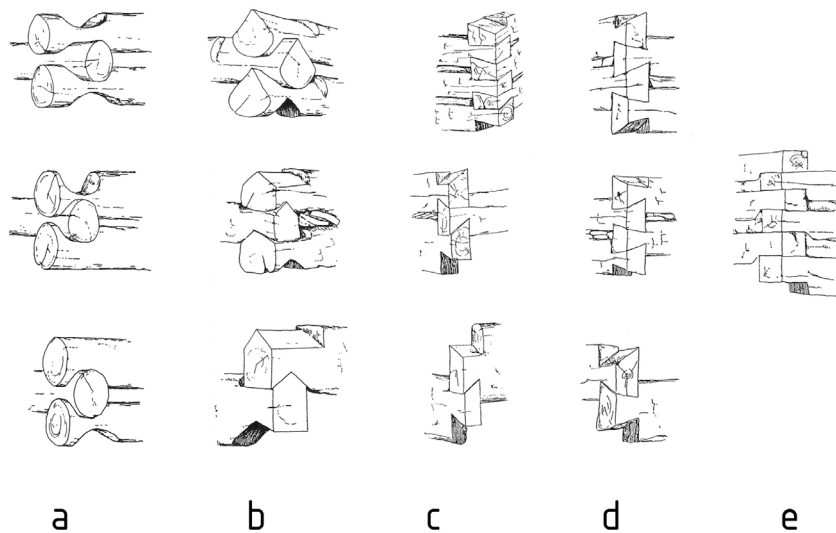


Fig.6:
Inkervingen

a) Zadel-inkerving
b) V-inkerving
c) Half-duivenstaart-inker-
ving
d) Vol-duivenstaart-inker-
ving
e) Halftand-inker-
ving

Het vlecht- en vakwerk als culminatie van technieken

'De meest gebruikelijke techniek voor eenvoudige woning- en hoevebouw tijdens de middeleeuwen – waarschijnlijk de meest gebruikte wandtechniek in onze streken sinds het Neolithicum tot in de 16e eeuw – was vakwerkbouw'⁹⁵. Onder het 'vakwerk' als wandtechniek wordt een geheel verstand van stijlen, regels, balken, platen en schoren, aan elkaar 'getoogd' tot een stijf en dragend houtskelet, waarin de holtes worden opgevuld. In thema van de scriptie wordt enkel ingegaan op het dichten met aarde – wat tevens veruit de meest frequent gebruikte techniek was – maar het moet worden vermeld dat ook baksteen⁹⁶ en hout hiervoor werden aangewend. Wat de woningbouw betreft bleef men in de steden tot de 17e eeuw en in de dorpen tot de 19e eeuw in vakwerk bouwen, maar omtrent het begin van de vakwerkbouw heersen in de literatuur verschillende opvattingen. Van Giffen (1952) dateert dit in Noordwest-Europa 'na de Karolingische tijd'^{97 98}, volgens Trefois (1979) volgt uit gedichten van Venantius Fortunatus dat het vakwerk in de Rijn- en Moezelstreek al in de 5e – 6e eeuw een bloeiperiode kende⁹⁹, en Voskuil (1979) besluit dat het vakwerk in Nederland pas tussen de 11e en 15e eeuw ingang vond¹⁰⁰. Hoe de constructie van de vakwerkwand zelf leidde tot verwarring over haar begindatum, wordt in de volgende paragrafen uiteengezet.

Het houtskelet

Schols (1958) herkent een groot verschil vanuit technisch oogpunt tussen de 'paalwoning'¹⁰¹ en een vakwerkhuis, al is het uiterlijk nagenoeg hetzelfde – namelijk dat van een volledig aarden wand of één waarin houten stijlen zichtbaar zijn. De beperkte houdbaarheid van in de grond geheide houten elementen – en volgens Trefois ook de ontwikkelde hoekverbindingen in het liggend blokwerk – hadden de mens geleerd wanden te construeren waarvan de houten delen kwamen te rusten op hoekstenen. Nu de stijlen van de vakwerkwand niet meer werden ingegraven, werd men gedwongen om bovengronds een constructie te bouwen die de nodige horizontale stabiliteit verzekerde. Daarom werden voor het vakwerkskelet noodgedwongen talrijke nieuwe verbindingen tussen de houten onderdelen zelf ontwikkeld, die niet worden aangetroffen bij de vroegere vlechtwerkwanden, noch bij de blokbouw¹⁰². De voetplaat, die ook al in de 12e eeuw bij stafbouwwanden werd aangetroffen, werd dus een vast en essentieel onderdeel van het vakwerk, en steunde in de vroegste skeletten op losse veldstenen. Het is daarom, zo argumenteren Schols (1958), Trefois (1979) en Goedseels en Vanhaute (1979), dat het begin van het vakwerk moeilijk te dateren is. Wanneer een vakwerkgebouw op voetplaat afbrandt of door een andere oorzaak verdwijnt, kunnen de losse stenen op de grond moeilijk een spoor achterlaten. Voskuil (1979) stelt echter dat deze redenering enkel steek kan houden voor de zandgronden^{103 104}, maar dat ze niet klopt voor klei- en veengebieden aan de kust of in rivierdelta's. Aangezien daar tot het einde van de Romeinse tijd geen sporen van onderregels of voetplaten¹⁰⁵ zijn teruggevonden, is het in ieder geval aannemelijk dat er op deze plekken tot dat moment nog

95. Goedseels en Vanhaute 1979, p40

96. Voskuil (1979) merkt op dat het vullen van een vakwerk met baksteen moet worden gezien als een overgangverschijnsel dat optrad vanaf de late middeleeuwen tot in de 18e eeuw, waarbij men zich wilde bedienen van de 'moderne' baksteen maar toch nog niet vertrouwd was met zijn constructieve eigenschappen (Voskuil 1979, p122). Deze invulling bevrijdde van de last van het regelmatige onderhoud, maar volgens Eggen (1989) 'had [baksteen] één groot nadeel: het was statisch en gaf dus niet mee met het aan weersinvloeden onderhevige skelet' (Eggen 1989, p109). Ook Harris (2003) vindt baksteen geen goed materiaal voor deze toepassing. Het is 'te zwaar, heeft de neiging waterdamp vast te houden en is een slechte isolator' (Harris 2003, p21). Vooral de tweede reden moet regelmatig aanleiding hebben gegeven tot een versnelde degradatie van het houtskelet, en dus droeg de baksteen ook op deze manier bij aan de ondergang van het vakwerk.

97. De Karolingische dynastie heerste over het Frankische rijk vanaf midden 8e tot de 10e eeuw.

98. Van Giffen 1952, p29

99. Trefois 1979a, p48

100. Voskuil 1979, p20

101. Hiermee refereert Schols naar de eerdere vlechtwerkwanden die zijn opgebouwd tussen in de grond geheide paaltjes.

102. Schols 1958, p9

103. Toch stelt Voskuil zich ook de vraag of deze redenering nog volledig geldig is met de 'veel verfijndere [archeologische] technieken die tegenwoordig [in 1979] worden toegepast' (Voskuil 1979, p20).

geen sprake was van vakwerkbouw¹⁰⁶. Bovenop eerder schaarse fysieke restanten, laten iconografische bronnen het toe een beeld te vormen van verdwenen bouwwijzen. Op Fig.7, een miniatuur uit de vroege 15e eeuw, zijn 2 technieken weergegeven. De paaltjes van de vlechtwerkwand rond de schapenstal zijn nog ingegraven, wat nog lang gebruikelijk was voor 'primitief bedoelde gebouwtjes', en de stijlen van de boerderij rusten op een voetplaat. Het moet echter worden gezegd dat historische gegevens nog steeds schaars blijven¹⁰⁷. De huidige kennis berust voornamelijk op vakwerken uit de 20e en laat 19e eeuw en bouwhistorisch onderzoek is aangewezen op dat wat toevallig gespaard is gebleven¹⁰⁸. Het onderstaande beeld is gebaseerd op literatuur die met deze bronnen is geschreven.

In principe bestaat elk vakwerkskelet uit dezelfde onderdelen. Er is enerzijds het gebint, een in een verticaal vlak gelegen samenstel van verticale en horizontale elementen en verstijvers. De gebinten zijn de primaire dragende componenten, waarop de verdiepingsvloer en het dak worden opgelegd. Ze staan loodrecht op de lengterichting van het gebouw staan en bakenen de traveeën af. Loodrecht op het gebint staat de eigenlijke wandskelet. In zowel het gebint als in de wand zijn er verticaal geplaatste dragende elementen – de stijlen¹⁰⁹, alsook schuin geplaatste dragende elementen – de benen – die ook in horizontale richting bijdragen aan de stabiliteit. Verder zijn er horizontale elementen; de platen en balken¹¹⁰ – die lasten afdragen naar de ondersteunende stijlen, en de regels – waarop de invulling van de wand steunt. Om het wandskelet en het gebint stijf te krijgen in hun langsrichting, worden korbelen en schoren¹¹¹ gebruikt. Bovendien worden na verloop van tijd de voetplaten op een muurvoet gelegd. De mate waarin en hoe deze onderdelen in een skelet worden gebruikt bepaalt de bouwkundige 'stijl' van het vakwerk, die zowel tijdsafhankelijk als geografisch gebonden is.

Een gedetailleerd overzicht van de verschillende wandvakwerktypes in West-Europa valt buiten het bereik van deze scriptie¹¹², maar het loont wel de moeite hier kort op in te gaan. Trefois (1979) onderscheidt op basis van resterende gebouwen en historische documenten 3 grote gebieden: in Scandinavië en de Alpen was het massieve – staand of liggend – blokwerk de dominante bouwmethode, in zuid-Engeland, noordwest-Frankrijk en zuidwest-Vlaanderen was dit het 'half-timmerwerk', en in het huidige Duitsland, Denemarken en het noorden van Polen het 'vakwerk'. Het half-timmerwerk is echter niets anders dan een vakwerk waarvan de stijlen op een zeer korte afstand van elkaar werden geplaatst – gaande van 7 tot 30 cm¹¹³. In het vakwerk was er een duidelijker onderscheid tussen de wand- en gebintstijlen, en werden deze ook op een veel grotere afstand van elkaar geplaatst – gaande van 100 tot 250 cm – wat resulteerde in veel grotere wandpanelen. De Lage Landen lagen volgens Trefois op het kruispunt van deze technieken¹¹⁴, en fungeerden dus als overgangszone waarbij de afstand tussen de stijlen stapsgewijs toenam naarmate men zich meer naar het oosten begaf. In tegenstelling tot hem zoekt Voskuil (1979) voor de situering van deze verschillende vakwerktypen

104. Overigens vervalt het argument van zodra men ging funderen met muurvoeten. Voskuil stelt dus dat de redenering kan worden omgedraaid, ervan uitgaand dat men vrij snel zou beginnen funderen vanaf men de techniek beheerste. Het ontbreken van funderingen zou dan tevens wijzen op het ontbreken van vakwerk op veldkeien (Voskuil 1979, p20).

105. Een onderregel is een balkje tussen de ondereinden van 2 stijlen, waarop enkel het vlechtwerk staat. Een (stijl) voetplaat is een balk die over een veel grotere lengte onder de stijlen doorloopt, waarop naast het vlechtwerk ook de wand- en gebintstijlen steunt.

106. Voskuil 1979, p20

107. Volgens Voskuil bestaan secundaire bronnen meestal uit afbeeldingen (miniaturen, schilderijen, kaarten of tekeningen). De belangrijkste bezwaren tegen deze afbeeldingen als bron zijn dat 'de beeldende kunstenaar zich bij zijn werk door andere overwegingen laat leiden dan de bouwkundig tekenaar', details (bewust) over het hoofd ziet of 'veranderingen aanbrengt wanneer hem dat te pas komt' (Voskuil 1979, p29). Afbeeldingen kunnen dus niet steeds ten volle worden vertrouwd als bouwhistorisch document. Bestekken en aannemingscontracten ontbreken nagenoeg geheel (Voskuil 1979, p50).

108. Voskuil 1979, p50

109. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen wand- en gebintstijlen. Wandstijlen hebben louter een dragende functie voor de nabijge wandinvulling. Gebintstijlen zijn dragende elementen, maken deel uit van een gebint en kunnen worden begrepen als de dragende kolommen. Ze kunnen evenwel tegelijk als wandstijl dienen.

110. De definitie van een plaat wordt gegeven in ⁶³. De doorsnede van een balk is als het

geen verklaring in de invloed van de Noormannen¹¹⁵ op inheemse bouwtradities. Beide constructies – het halftimmerwerk en het vakwerk – moeten nog steeds ook worden begrepen als een drager van de vlechtwerkwand. Gelet op de dubbele functie van de stijlen – het dragen van platen en balken enerzijds en de verstijving van het vlechtwerk anderzijds – had men de keuze voor oftewel een groot aantal stijlen met kleine doorsnede, oftewel een geringer aantal zware stijlen en daaraan bevestigde zware regels. Het is omdat in de kustgebieden zwaar en groot hout schaarser was, dat men volgens Voskuil (1979) daar juist voor de eerste optie koos¹¹⁶, maar in se heeft dit niets te maken met verschillende cultuurgebieden.

Ook het gebint werd doorheen de geschiedenis op verschillende manieren opgevat. Eén type verdient extra aandacht, al kwam dit hoofdzakelijk voor in Engeland; het krukgebint. In de Lage Landen echter waren de 'dakzuil' en later het 'ankerbalkgebint' de dominante technieken. De dakzuil was een kolom, in het midden en over de hele hoogte van het gebouw, die rechtstreeks de nokgording ondersteunde, alsook de vloerbalken. Aangezien dit systeem dus gebruik maakt van enkele hinderlijke kolommen in het midden van de ruimte, werd gezocht naar een manier om de overspanning van wand tot wand te maken zonder extra steunpunten; het ankerbalkgebint. Zoals eerder vermeld, was ook dit gebint een 'samenstel' tussen verschillende afzonderlijke elementen, waaronder de zware en belangrijke ankerbalk of 'moerbalk', die enerzijds de verdiepingsvloer droeg en anderzijds een deel van de spatkrachten van het dak opving¹¹⁷. Het Engelse¹¹⁸ krukgebint daarentegen bestond in de eerste plaats uit 2 'krukken', lange kromme balken die paarsgewijs met elkaar verkeept zijn. Ze liepen als één element van de voetplaat tot aan de nok en ondersteunden zowel de gordingen in het dak als de wandstijlen¹¹⁹. Sommige krukken zijn zacht gekromd of bijna recht, anderen maken een harde hoek; de vorm was afhankelijk van de beschikbare bomen. Gewoonlijk – maar niet altijd – werd een boom in de lengte in 2 gezaagd om zo een paar krukken te bekomen met een identiek maar tegengesteld profiel¹²⁰. Krukken met grotere afmetingen bestonden waarschijnlijk uit afzonderlijke stukken die aan elkaar werden bevestigd door middel van een schuine haaklas met wiggen. In ieder geval onderscheidt het krukgebint zich van elke andere dakondersteuning door haar opvallende spitsboogvorm en doordat – net als bij de komwoning – het dak en de muur door eenzelfde element werden gedragen.

Onafhankelijk van de wijze waarop het wandvakwerk – of het gebint – werd opgevat, lagen er gelijkaardige materialen en constructietechnieken aan de basis van het eindresultaat. Voor de muurvoet werd oorspronkelijk vaak gebruik gemaakt van veld¹²¹ – en rivierkeien. Grotere steenbrokken werden aan de hoeken van het grondplan in de aarde vastgezet, daarna werd ze verbonden door het opstapelen van kleinere stenen tot een losse fundering. Naast deze oppervlaktestenen werd ook gebruik gemaakt van breukstenen¹²², zandsteen en het krijtgesteente mergel, wat ondergronds of in

ware die van een plaat, gedraaid over 90°.

111. Het verschil tussen wat als 'korbeel' en als 'schoor' wordt benoemd staat niet volledig vast. Er lijkt alleen sprake te kunnen zijn van een korbeel bij een element dat de ingesloten hoek tussen een plaat en stijl verstijft, langs de onderkant van de plaat.

112. Hiervoor wordt verwezen naar (Trefois 1979a), (Trefois 1979b) en (Goedseels en Vanhaute 1979).

113. Trefois 1979a, pp 49,57

114. Trefois onderscheidt in onze gewesten nog eens 3 vakwerktypen: een Kempo-Bra-bants-Vlaamse en een Weste-lijk-Vlaamse – waarvan het aantal stijlen en liggers in de wanden op een minimum werd gehouden – en een Oostelijk-Vlaams-Waal-se – waarbij de gecompliceerde samenstelling van het skelet en de brede wandpanelen opvallend zijn (Trefois 1979a, p47).

115. De Noormannen, zo argumenteert Trefois, hebben in Engeland en noordwest-Frankrijk de stafbouwtechniek verspreid. In de 12e – 13e eeuw zou het halftimmerwerk – waarbij tussen elke 2 stijlen één werd weg-gelaten – hieruit zijn ontstaan, gestimuleerd door de steeds groter wordende schaarste aan hout (Trefois 1979a, p55).

116. Voskuil 1979, p56

117. Trefois 1979a, pp 65, 79-85

118. Het krukgebint kende haar grootste verspreiding in Engeland – behalve in het zuidoosten – en Wales. Toch is dit gebint ook op enkele plekken in Normandië, noordwest-Duitsland en West-Vlaanderen aangetroffen, in de 7e – 8e eeuw (Trefois 1979a, p69) (Harris 2003, p9).

119. Harris 2003, p9

120. Ibid., p73

121. Een veldkei is een steen die door een gletsjer is

groeves werd gewonnen. In de latere middeleeuwen begon men de muurvoet steeds vaker te metselen met bakstenen in volle grond, en volgens Voskuil (1979) is dit 'te beschouwen als het begin van een volledige verstening'¹²³. Trefois (1979) stelt dat men 'ook aarde, turf en plaggen [...] als basis [wist] aan te wenden'¹²⁴, wat overigens materialen waren die het hoofddoel van de muurvoet – het houtskelet afschermen van opstijgend vocht – grotendeels te niet deden. De muurvoet bereikte hoogtes van 30 tot 70 cm, wat voor de stenen varianten voldoende was om capillair vocht uit het skelet te houden. Voor het eigenlijke vakwerk werd een onderscheid gemaakt tussen 'hard hout', gebruikt voor het dragend wandskelet en gebint, en 'zacht of licht hout', voor de minder belangrijke onderdelen in het interieur¹²⁵. Hout werd gebruikt omwille van haar taaiheid, hoge druk- en treksterkte en hoge elasticiteit. Bovendien was het in vele streken aanvankelijk bijna overal te vinden. De stijlen en platen werden tot het einde van de middeleeuwen gewoonlijk uit het geprefereerde eikenhout gemaakt, behalve in de kuststreken. 'Voor het richten van een boerenhuis waren vaak 50–65 eiken nodig'¹²⁶. Toen dit na verloop van tijd schaarser werd, ging men zachtere en minder duurzame¹²⁷ – durable – houtsoorten gebruiken, aanvankelijk essen- en iepenhout en later populieren- en dennenhout. Harris (2003) vermeldt ook nog het gebruik van de tamme kastanje en de zwarte populier¹²⁸. Hoewel eik door zijn eigenschappen veruit de voorkeur genoot – taai, hard, een hoge treksterkte en weinig gevoelig voor weersinvloeden – werd er zelfs in tijden dat er wel nog aan eikenhout te komen was, vaak naar deze andere soorten gegrepen vanuit financieel oogpunt. Eggen (1989) besluit dat 'de suggestie van welvaart het nogal eens won van het denken in termen als duurzaamheid'¹²⁹.

De bomen werden meestal in de winter geveld. Hoewel het bevroren hout gevoeliger was voor scheuren door de impact bij het vallen, had men een bevroren ondergrond nodig om de zware stukken uit het bos te halen¹³⁰. Eggen (1989) haalt een voorschrift uit 1477 aan waarin wordt bepaald dat gekapt hout binnen 6 weken moest worden verwerkt tot 'timmerhout'. Wanneer de houten elementen dan ook meteen in een vakwerk werden gebruikt, zorgde latere droogkrimp voor extra aangetrokken verbindingen¹³¹. Het lijkt echter sterk dat steeds zo snel werd gewerkt, zeker wanneer een boom in de winter werd geveld. Om te beginnen werden de stammen 'geschild' – ontdaan van de schors. De meest voorkomende bewerking was om uit het kernhout van een stronk een balk te halen met grofweg vierkante doorsnede, waarbij de randen min of meer vlak werden gemaakt met een bijl of dissel. Te dikke stronken werd gekliefd in de lengterichting met ijzeren wiggen en een hamer. Op deze manier konden – eveneens na bewerking met bijl of dissel – 2 balken of 4 dikke planken uit één doorsnede worden gehaald. Vanaf het begin van de 17e eeuw kreeg men de beschikking over 'beter ijzer en staal', waardoor de kraanzaag¹³² definitief haar intrede deed. Hoewel het zaakvlak vlakker is dan het oppervlak dat eerst werd gekliefd en nadien met bijl of dissel werd nabewerkt, is het gezaagde timmerhout minder duurzaam, omdat bij het zagen tal van houtvezels

meegevoerd. In de Lage Landen komen veldkeien enkel van nature voor ten noorden van de lijn Haarlem-Utrecht-Nijmegen. Zuidelijker dan die lijn kwam er geen landijs voor dat keien heeft achtergelaten.

122. Natuursteen die ongekapt of licht bewerkt uit de steengroeve is gebroken.

123. Voskuil 1979, p53

124. Trefois 1979a, p42

125. Trefois (1979) gaat hier niet verder op in, maar in alle waarschijnlijkheid gaat het louter over het onderscheid tussen loof- en naaldhout.

126. Trefois 1979a, p59

127. Volgens Voskuil (1979) versnelde deze ontwikkeling ongetwijfeld de overgang naar de baksteenwand (Voskuil 1979, p53), aangezien de minderwaardige houtsoorten sneller degradeerden in een buitenomgeving. De Europese eik is 'matig duurzaam' tot 'duurzaam' (duurzaamheidsklasse II/III), en Trefois (1979) verklaart dat 'een houten woning tenminste 3 eeuwen stand kan houden' (Trefois 1979a, p41). Het kernhout van de andere soorten daarentegen is 'niet duurzaam' (duurzaamheidsklasse V) en bovendien gevoelig voor aantasting door schimmels en houtrot, alsook door spinthout- of houtwormkevers en de boktor (Belgian Woodforum 2022).

128. Harris 2003, p19

129. Eggen 1989, p23

130. De gevelde stammen werden op verschillende manieren getransporteerd. Dat ging met paard en eventuele wagen. De stammen konden worden vervoerd met een 'mallejan', wat in feite een wielas met 2 grote wielen en dissel is, of een 'boomwagen', als het om zeer zware stammen ging (Eggen 1989, p24).

131. Eggen 1989, p29

132. De kraanzaag was een lange zaag, met een blad tot 220

worden gesneden. Dit maakt het oppervlak vatbaarder voor indringing van vocht en pollutanten¹³³. Voor het op lengte zagen van een element, werd gebruik gemaakt van de 'kortzaag' of de 'spanzaag'. Wat betreft de lengte van het timmerhout was 3-6 m veelvoorkomend, lengtes boven 9 m niet ongewoon en konden middeleeuwse timmerlieden af en toe balken bewerken tot 15 m lang¹³⁴.

In het traditionele vakwerk werden de onderdelen samengehouden door houtverbindingen. Harris (2003) onderscheidt 3 groepen; de pen-en-gat verbinding (zie Fig.8), de halfhoutsverbinding en een derde verbinding; de las, die werd gebruikt om platen of balken in de lengte aan elkaar te bevestigen om zo een langer element te bekomen¹³⁵. Het pen-en-gat principe diende als basiswerkwijze om de onderdelen van bijna elke variant van de 3 soorten verbindingen vast te zetten. Een pen, gevormd uit het uiteinde van één onderdeel, werd ingebracht in een gat. De verbinding wordt vastgezet met een houten 'toognagel' die door een rond 'tooggat' doorheen de gehele verbinding wordt geslagen. Door de wijze waarop het installeren van de toognagel werd opgevat (zie Fig.9), werd hij onderworpen aan grote interne schuifspanningen, daarom werd ook de nagel vrijwel altijd uit eik gemaakt. De toognagel kon gezaagd worden met een penzaag en nadien afgewerkt worden met hamer en beitel. Het tooggat werd voor de 17e eeuw ook met hamer en beitel gevormd in het hout, later werd het uitgeboord met een 'avegaar'¹³⁶ en uitgediept met een lepelboor¹³⁷. Volgens Trefois werden 'gedurende het richten [...] sommige onderdelen een tijdje lang in water gelegd alvorens de nodige gaten er in te boren. [Na het boren van de tooggaten] werden de vochtig gemaakte en de droog gehouden [onderdelen] gekoppeld. Door [droogkrimp] werden de verbindingpunten vaster aaneen geprangd'. Ook stelt hij dat door de windbelasting 'op den duur in de verbinding een zekere beweging komt. Daarom werden "op tijd en stond" [...] de nagels aangedreven om de verbindingpunten opnieuw sterk aaneen te prangen en hierdoor de elasticiteit van het houten skelet op het strikt nodige te brengen'¹³⁸. Hoe frequent dit juist moest gebeuren, zal afhankelijk zijn geweest van de uitvoering van de verbindingen enerzijds en het structureel concept van het hele vakwerk anderzijds. De vakwerkregels¹³⁹ werden indien nodig op voorhand klaargemaakt om de wandopvulling te kunnen dragen, waarop verder wordt ingegaan. In dit geval werd in de bovenkant van de regel een gleuf gehakt met een bijl of beitel, en in de onderkant werden gaten geslagen met de 'holbeitel'.

Eens de muurvoet en bijhorende muurvoetplaat gelegd waren, werd overgegaan tot het oprichten van het skelet. De onderdelen werden vooraf in het werkhuis van de timmerman of op de site genummerd, om het uiteindelijke richtwerk gemakkelijker te maken (zie Fig.9)¹⁴⁰. Deze merken werden gezet met een ritsmes, beitel, bijl of zaag¹⁴¹. De gebinten – als primaire elementen – werden steeds als eerste opgericht op de muurvoetplaten. In essentie bestonden die gebinten steeds uit een bokconstructie, bestaande uit 2 verticale gebintstijlen, verbonden door een ankerbalk. Vaak werd deze – nog instabiele – basisconstructie in één stuk opgericht, waarbij de pennen aan de

cm lang, die door 2 man werd gehanteerd. Ze werd ofwel in een zaagkuil, ofwel op een opstelling van 2 paar bokken gebruikt (Eggen 1989, p25).

133. Eggen 1989, pp 25,29

134. Harris 2003, p117

135. Ibid., p13

136. De avegaar is een werktuig dat bestaat uit een metalen steel met een schroefkop aan het uiteinde, bevestigd aan een (houten) handvat. Met dit werktuig kunnen gaten handmatig worden geboord in zachte materialen (Eggen 1989, p29).

137. Eggen 1989, p31

138. Trefois 1979a, p60

139. Zoals eerder werd geschreven droegen de regels in het 'vakwerk' de wandinvulling. Het vlechtwerk werd echter op verschillende manieren aan het vakwerk bevestigd, in vele gevallen moesten de regels niet op voorhand worden bewerkt. Ook zijn er regels bij het 'halftimmerwerk', maar vervangen de stijlen hier deze functie.

140. Voor een uitgebreid overzicht van het nummersysteem in vakwerkconstructie wordt de lezer doorverwezen naar (Eggen 1989, p38).

141. Enkel indien krijgt werd gebruikt, bleven de telmerken niet lang bestaan, in de andere gevallen laat dit systeem na honderden jaren nog toe om uit te vinden welke onderdelen tot de oorspronkelijke constructie behoorden (Eggen 1989, p33).

uiteinden van de stijlen zorgvuldig in de uitgehouwen gaten van de voetplaten moesten worden gezet. De stijlen werden volgens Trefois (1979) omgekeerd 'of op den kop' geplaatst – relatief tegenover hoe het hout ooit in de boom was georiënteerd – met als doel het boomsap er te laten uitvloeien, wat aantasting door houtzwam moest beletten en het verstenen van de eiken stijlen bespoedigde¹⁴². Niet uitzonderlijk werden gebinten zelfs tot de laatste korbeel al gemonteerd op de grond. Het meeste stelwerk kon worden gedaan met enkel touwen en katrollen maar voor het oprichten van deze zwaardere – samengestelde – stukken werd gebruik gemaakt van een 'dommekracht', een grote krik, of een kaapstander die werd benut als kraan¹⁴³. Bij de meerderheid van de vakwerkelementen moest het montagewerk één voor één gebeuren in de constructie zelf, waarbij de volgorde ervan sterk afhankelijk was van de gebruikte houtverbindingen – in het bijzonder wanneer lasverbindingen werden aangewend¹⁴⁴. De centrale rol die de verbindingen in de vakwerkconstructie speelden, wordt tevens duidelijk wanneer de dimensies en vormgeving van haar onderdelen worden onderworpen aan een moderne structurele analyse. Zo is het veelvuldig gebruik van 'platen', waarvan de doorsnede een grotere breedte dan hoogte kent, niet te verklaren vanuit materiaal-economisch perspectief. Het is vaak misleidend om een vakwerkstructuur te analyseren met moderne structurele principes. Het goed 'werken' van deze structuur¹⁴⁵ hing af van de compatibiliteit van haar samenstellende onderdelen, eerder dan van de economie of efficiëntie van ieder onderdeel – wat moderne maatstaven zijn.

142. Enerzijds lijkt deze procedure enkel zin te hebben gehad wanneer toch spinhout werd gebruikt, wat normaliter werd vermeden voor gebintstijlen. Anderzijds werden houten elementen ook regelmatig bevochtigd voor de montage, zoals geschreven. Allicht zocht men op deze manier ook dit vocht sneller af te voeren.

143. Eggen 1989, p34

144. Harris 2003, p16

145. Hoe goed een structuur werkte, werd ook in niet verwaarloosbare mate bepaald door hoe goed ze te (de-)monteren was, naast haar stabiliteit.



Fig.7:
De maand Februari in het Getijdenboek van de Hertog van Berry, door de Gebroeders van Limburg, ca. 1410



Fig.8:
Pen-en-gat verbinding



Fig.9:
*Genummerde onderdelen
in het vakwerkskelet, Po-
peringe*

De wandinvulling

In de meeste gevallen was het de bedoeling het houtskelet zichtbaar te laten, maar dat dit niet altijd zo was wordt verderop gduid. Zoals eerder geschreven werden de holtes in het vakwerk opgevuld, waarvan het dichten met aarde de meest gebruikelijke manier was. Een veel gebruikte techniek was het aanwenden van leem- of 'kleemkoeken'. Op een volume lemige of kleiachtige grond van ongeveer 30x30x5 cm, werden strohalmen gelegd en gelijkmatig verdeeld. Nadat deze koeken in 3 gelijke delen werden toegevoegd, werden ze in geschrante rijen op elkaar gelegd tussen de vakwerkstijlen. Na het uitdrogen van de leemkoeken ontstond een solide wand. Een andere techniek bestond erin het vakwerk op te vullen met lemen stenen, of 'kluten', die aan de zon werden gedroogd¹⁴⁶. Van alle aardetechnieken kwam de vlechtwerkwand echter het meest voor. In principe was deze techniek gedurende eeuwen slechts weinig geëvolueerd. Het vlechtwerk waarmee de bandkeramiekers en de Germanen hun wanden opbouwden verschilde niet veel van dat wat werd gebruikt vanaf de vroege middeleeuwen tot in de 19e eeuw – wat meteen een teken was van zijn toepasbaarheid – zij het dat het latere vlechtwerk door een dragend houtskelet werd ondersteund.

Zoals eerder geschreven werden de vakwerkregels vaak zo afgewerkt dat er tussen deze regels verticale spijlen konden worden geklemd, in gaten in de onderste regel en een sleuf in de bovenste regel. Dit was gedurende lange tijd de meest gebruikelijke vlechtwerktechniek¹⁴⁷. De spijlen bestonden hier uit gekleefd hard hout – bij voorkeur eikenhout – van 3 tot 5 cm dik. Over de onderlinge afstand bestaan verschillende meningen in de literatuur¹⁴⁸, maar waarschijnlijk hield dit gewoon verband met het materiaal dat werd gebruikt om kruislings rondom de spijlen te vlechten¹⁴⁹. Hout dat hiervoor werd gebruikt waren bij voorkeur lichte en flexibele twijgen, zoals die van wilgensoorten, hazelaar, lijsterbes, witte berk en vuilboom (zie Fig.10), al werd voor de 18e eeuw ook gebruik gemaakt van fijn gekleefde hardhouten¹⁵⁰. In het noorden van Nederland werd er volgens Voskuil (1979) echter gewoonlijk gevlochten met 'strobanden', die bestonden uit stro dat werd uitgespreid, bedekt met leemaarde, en in elkaar werd gedraaid alvorens het doorheen de spijlen te vlechten (zie Fig.11)¹⁵¹.

Nadat het vlechtwerk was geïnstalleerd als wapening van de wandinvulling, diende de wand te worden gedicht met een aardemengsel op basis van ondergrond, stro en water, met additieven als koemest, dierlijke urine en kalk – een mengsel dat vaak wordt beschreven als 'stroleem'. Het aanbrengen van het aardemengsel op het vlechtwerk gebeurde eerst langs de binnenzijde, zodat die al wat kon uitdrogen, en vervolgens langs de buitenkant, wat tussen het houten skelet invulwanden opleverde van ca. 10 cm dik¹⁵². Eggen (1989) heeft het over een stroleempakket van gemiddeld 12 cm, en stelt dat 'de basis van het mengsel bestond uit ongeveer 80 procent stro en maar 20 procent leem'¹⁵³ ¹⁵⁴. Typisch werd het mengsel in handteerbare hoeveelheden met kracht tegen het vlechtwerk 'geworpen', waardoor het zich

146. Trefois 1979a, p46

147. Naast het inklemmen van spijlen tussen de vakwerkregels, bestond er ook een techniek waarbij de spijlen of 'latten' tegen de regels werden genageld. Indien dit gebeurde langs de buitenkant van de regel, die verzonken zat ten opzichte van de wandstijl, waren enkel de stijlen nog zichtbaar na het belemen (zie Fig.12). De regel kon echter ook in het vlak van de stijlen worden gezet, waarbij de vlechtwerklaten dan langs de binnenkant werden genageld. In ieder geval werd met deze bouwwijze bespaard op het houtskelet: de regels hadden nog maar de helft van de oorspronkelijke dikte (Eggen 1989, p103). Bovendien was ze eenvoudiger en minder arbeidsintensief 'omdat het boren van gaten, het beitelen van een groef en het maken van spijlen [...] meer gereedschap vraagt' (Voskuil 1979, p65). In die zin moet deze techniek vooral populair zijn geweest op plekken waar hand gesmede nagels gemakkelijker verkrijgbaar waren dan eikenhout, of vanaf de Industriële Revolutie, wanneer de mechanisch geproduceerde 'cut nail' op de markt kwam. Ook verving stro soms het vlechtwerk in de wanden van stallen en schuren. Wanneer de vakwerkstijlen dicht genoeg tegen elkaar werden gezet, konden aan beide kanten horizontale latten worden gespijkerd, waartussen bossen stro werden geklemd of met tenen werden vastgebonden. Soms werden de tenen dan weer bewerkt met ruitvormig gevlochten strobanden (zie Fig.13). Voskuil (1979) kent aan dit patroon dan ook geen decoratieve functie toe. Volgens hem diende het ter vervanging van het eigenlijke vlechtwerk, wanneer met het oog op ventilatie beter niet beleemd kon worden of men zich de moeite van het vlechten met teenhout wilde besparen (Voskuil 1979, p71).

148. Trefois (1979) heeft het

vastzette. Nadat een vak was opgevuld, werd met een 'plakspaan' de massa gelijkmatig tot een vlak gestreken, waarna een afwerking kon volgen¹⁵⁵. Deze afwerking geschiedde door het aanbrengen van 'één of meer "fijnere" bovenlagen om de oppervlakte effen te maken, waarna de wand, in het bijzonder [in Limburg en omstreken] maar ook wel elders, nog weer een kalklaagje kreeg [...]'¹⁵⁶.

De ondergrond – of aarde – in het mengsel is van nature een mix van klei, silt, sand en de grovere deeltjes; gravel en keien¹⁵⁷. Net zoals cement dat in beton doet, dient de kleifractie als bindmiddel voor alle grotere gronddeeltjes¹⁵⁸. Silt, zand en gravel gedragen zich simpelweg als aggregaten, zonder bindingssterkte¹⁵⁹. Aangezien de bindings- en druksterkte de belangrijkste materiaaleigenschappen zijn om van een grondmonster in te kunnen schatten of het bruikbaar is als bouw materiaal, dient de hoeveelheid kleideeltjes groot genoeg te zijn¹⁶⁰. Maar tegelijkertijd bepaalt de kleifractie ook voor een groot deel het zwel- en krimpgedrag wanneer grond nat wordt en uitdroogt respectievelijk¹⁶¹, wat na verloop van tijd behoorlijke schade kan veroorzaken aan de wand. Dit gegeven stelt dus ook een bovengrens aan de kleifractie in bouwaarde. Weismann e.a. (2013) stellen daarom dat de kleifractie 'grofweg' 15-25 % moest bedragen en de 'aggregaten' instaan voor het overige deel, nog eens benadrukkend dat silt, zand en de grove deeltjes de hoofdingrediënten zijn en de klei slechts fungeert als 'mortel tussen stenen'¹⁶². Uiteraard liet men de korrelverdeling van de ondergrond niet testen in een laboratorium¹⁶³, maar toch waren er manieren om zijn geschiktheid – lees: het kleigehalte – te verifiëren¹⁶⁴. Volgens Eggen (1989) 'maakte men eerst proefballetjes' van ongeveer 4 cm in diameter¹⁶⁵. Door een balletje te laten vallen van een hoogte van 1,5 m en te bekijken in welke mate er na impact scheuren of verbrokkeling optrad, kon men de bindingssterkte van een grondmonster inschatten¹⁶⁶. Hetzelfde kon men inschatten door een 'uitroltest', waarbij men worstjes rolde uit vochtige grond tot ze in stukken braken, om dan de lengte van het afgebroken stuk te meten. Ook door visuele inspectie, of door aanraking en zelfs door te proeven en te ruiken kon men inschatten of de grond geschikt was om gebruiken in het wandmengsel¹⁶⁷. Aangezien met geen van deze proeven de samenstelling van de ondergrond nauwkeurig kunnen worden vastgesteld, moet een groot deel van de interpretatie van proefresultaten ook berust zijn op ervaring en kennis die generaties lang werd doorgegeven, en kan ook worden aangenomen dat er meestal geen ondergrond met een optimale korrelverdeling werd gebruikt.

Om de goedgekeurde ondergrond werkbaar te maken werd deze traditioneel bevochtigd en 20 tot 40 cm hoog opgestapeld, om ze tijdens de winter te laten 'uitvriezen'. Het uitzetten van het bevroren water veroorzaakte de desintegratie van aardekluiten en creëerde een homogene massa¹⁶⁸. Wanneer het overigens niet vroom, liet men de ondergrond op dezelfde manier 'uitrotten' of 'verschralen', waardoor alle resterende organische stoffen uit het mengsel verdwenen en een beter bindingssterkte werd verkregen. Verder, zo schrijft Trefois

over een tussenafstand van 10-30 cm (Trefois 1979a, p45), volgens Harris (2003) bedroeg deze afstand 30-45 cm (Harris 2003, p20) en Schols (1958) spreekt over 50 cm (Schols 1958, p23).

149. Voskuil 1979, p66

150. Eggen 1989, p102

151. Voskuil 1979, p66

152. Goedseels en Vanhaute, p129

153. Eggen verschaft hierover geen duidelijkheid, maar hier gaat het over volumepercentages %vol. Volgens Minke (2006) wordt over 'stroleem' gesproken voor een mengsel met een hogere dichtheid dan 1200 kg/m³. 'Als 10 [volume]delen gehakt stro worden gemengd met een dikke leembrij bestaande uit 2 delen droge kleiachtige leem en 1 deel water, geeft dit een mengsel met een droge [massa]dichtheid van ongeveer 1300 kg/m³ (Minke 2006, p48).

154. Eggen 1989, pp 103,104

155. Ibid., p107

156. Voskuil 1979, p71

157. De in de EU aangenomen 'british standard' (BS) definieert de korreldiameter van kleideeltjes < 0,002 mm, die van silt deeltjes tussen 0,002 en 0,063 mm en die van zand deeltjes tussen 0,063 en 2 mm. Gravel en keien zijn groter (Minke 2006, p19).

158. Zie ook onderdeel 'A8. Basis leempleister: productie kleideeltjes'.

159. Minke 2006, pp 19,20

160. De Duitse norm DIN 18952 stelt voor een moderne toepassing een minimale bindingssterkte van 50 g/cm², wat overkomt met een kleifractie van 20% (Minke 2006, p33).

161. Niet alleen de hoeveelheid klei, maar ook het type kleimineraal is van belang in deze context (bij montmorilloniet klei is het krimpeffect veel groter dan bij kaoliniet en illiet). Ook de korrelverdeling van silt en zand

(1979), 'wist [men] de onzuivere of "magere" delen af te scheiden van de bruikbare en meteen humusvrij gemaakte "vette"¹⁶⁹ leemdelen¹⁷⁰. De grond werd op het platteland in principe direct in de buurt van de bouwplaats gewonnen. 'Het meest voor de hand liggende', aldus Eggen (1989), 'is dat de leem afkomstig was uit de put die gegraven werd voor het bouwen van de kelder', of hij werd gewonnen uit het diepere gedeelte van een mestvaalt¹⁷¹. 'Met betrekking tot de leemvoorziening in de steden kan verwezen worden naar de vondst van tal van leemputten in de hoge oever van de Jeker in Maastricht [...], daar werd leem gewonnen tussen 1400 en 1700'¹⁷². Om steden te voorzien van bouwarme lijkt er dus een collectieve economie te zijn georganiseerd.

Traditioneel werden allerhande plantaardige vezels gemengd door de aarde, zoals vlasresten, kaf, gras, maar vooral stro. Het nut van de vezels in het aardemengsel was veelzijdig. Ten eerste fungeerden ze als wapening in de aarde die van nature slechts een lage trek- en schuifsterkte heeft¹⁷³ door trekspanningen op te nemen. Daarbij werd het ontstaan van structurele schuren in de aardematrix vermeden doordat ze als haarscheurtjes werden uitgespreid langsheen de vezels¹⁷⁴. Ten tweede werd bij het mengen extra water geabsorbeerd in de poriën van de vezels. Dit, en het feit dat door de toevoeging van vezels het kleigehalte in het mengsel verlaagt, zorgde ervoor dat de droogkrimp van het aardemengsel verminderde. Ten derde verlaagde de aanwezigheid van plantaardige vezels de massadichtheid van het mengsel. Samen met de lucht die werd vastgehouden in hun holle stengels verhoogde dit de thermische isolatiewaarde. Daarentegen verklaart deze laatste eigenschap logischerwijs ook waarom door de toevoeging van gesneden stro de druksterkte van het grondmengsel daalde¹⁷⁵. Een bedenking die vaak wordt gemaakt is dat het organische stro verrot binnenin de wand, en op deze manier haar duurzaamheid ondermijnt. Volgens Weismann e.a. (2013) rot het stro echter 'zeer weinig', aangezien er weinig zuurstof en vocht voorhanden is eens de wand is uitgedroogd¹⁷⁶. Ook dit duidt op het belang van de muurvoet – muurvoetplaat opstelling. Volgens Eggen (1989) werden er in de 'bovenlaag' of afwerkingslaag van de muur, dat bestond uit 'fijne gezeefde leem', fijnere vezels gebruikt dan in grovere onderlaag, zoals fijn hooi of gehakt haar, meestal paardenhaar¹⁷⁷.

'Niets op aarde is mogelijk zonder water', en het maken van een bruikbaar grondmengsel was dat evenmin¹⁷⁸. De aanwezigheid van water is vereist opdat de aggregaten kunnen worden gecoat door de kleideeltjes, zodat de binding tussen de verschillende onderdelen kon worden verzekerd. Bovendien diende water ook in een juiste hoeveelheid te worden toegevoegd om een werkbaar mengsel te bekomen. Als er genoeg – maar tevens niet te veel – water bij het mengsel werd gegoten, dan kon de bindingssterkte worden verhoogd door te kneden, te mengen en te laten drogen. Deze droogperiode, waarin de natte, 'verse' aardewand haar evenwichtsvochtgehalte bereikte, was overigens veel korter dan de droogperiode van nat gemaakte gebakken stenen¹⁷⁹. Water is echter niet enkel een vereiste component om een grondmengsel werkbaar te maken, het

speelt een rol in het krimpgedrag van grond (Minke 2006, p24).

162. Weismann, Bryce, en Main 2013, pp 47,53

163. Een veelgebruikte moderne proef om de korrelverdeling van een grondstaal te bepalen is de bezinkingsproef met een hygrometer, waarbij een grondmonster in suspensie wordt gebracht.

164. De indruk mag echter niet ontstaan dat het kleigehalte de enigste parameter van belang is. Zo kan de druksterkte van een grondstaal ook gevoelig worden verbeterd door het optimaliseren van de silt-, klei- en gravelfracties (de inerte massa), zonder te raken aan het kleigehalte (Minke 2006, p43). Het is echter wel zo dat deze optimalisatie niet tot de mogelijkheden behoorde in een pre-industriële context, maar een ruwe inschatting van het kleigehalte wel.

165. Eggen 1989, p106

166. Zo vertoont een balletje met een te hoog kleigehalte nauwelijks scheuren maar vlakt het uit na impact. Wanneer het balletje volledig verbrokkelt, heeft het een te laag kleigehalte en is het niet bruikbaar als bouw materiaal (Minke 2006, p23).

167. Een visuele inspectie berust op het feit dat klei een zeker kleurpallet en een meer opvallende glans vertoont. Bovendien voelt klei vettig en zacht aan, waar silt en zand 'meelachtig' en kruimelig voelen, zowel in de hand als in de mond, en is kleiachtige grond veel moeilijker af te wassen. De geurtest geeft dan weer een indicatie over de aanwezigheid van organisch materiaal, dat een muffe geur afgeeft en waar absoluut niet mee gebouwd mag worden (Weismann, Bryce, en Main 2013, p43).

168. Minke 2006, p36

169. 'Vette leem' is grond met een hoog kleigehalte.

170. Trefois 1979b, p81

vormt tegelijk de grootste bedreiging voor de integriteit van een aardewand. Grond is niet inherent en verandert van volume, zelfs bij licht schommelende vochtgehaltes, wat direct aanleiding geeft tot scheurvorming. Om hieraan tegemoet te komen, is het noodzakelijk additieven toe te voegen aan het grondmengsel.

Zoals eerder al beschreven, was mest een gebruikelijke additief in het wandmengsel. Maar wat maakt mest 'vaster van structuur' en 'beter bestand tegen de regen', zoals Voskuil (1979) beweert? Millogo e.a. (2016) onderzochten het stabiliserend effect van koemest op de fysische en mechanische eigenschappen van een kleigrond¹⁸⁰. De onderzochte grond – ook representatief voor de Lage Landen – was rijk aan kaoliniet en bezat een substantiële hoeveelheid kwarts- en ijzermineralen¹⁸¹. Uit een spectroscopische analyse bleek verder dat koemest zelf, naast aluminiumoxide, calcium, kalium en een aantal andere stoffen, voornamelijk het mineraal siliciumdioxide – of silica – bevat. Doorheen mest zitten van nature ook veel onverteerde plantenvezels gemengd, opgebouwd uit cellulose, hemicellulose en lignine. De mest heeft effect op de aarde op 2 verschillende manieren. Enerzijds katalyseert water een chemische reactie waarin de silica in de mest reageert met de kaoliniet en kwarts in de aarde, waardoor onoplosbare silicaat amines worden gevormd, die het vermogen hebben de afzonderlijke gronddeeltjes aan elkaar te 'lijmen'. Dit zorgt ervoor dat enerzijds de microstructuur van de grond homogener wordt doordat de hoeveelheid en de grootte van de poriën daalt, en anderzijds scheurtjes minder gemakkelijk ontstaan en zich voortplanten. De andere manier waarop koemest de grond stabiliseert, is door middel van de plantaardige, korte vezels. Hun ruwe oppervlak zorgt voor een goede hechting met de aardematrix. Op deze manier fungeren de celluloserijke – een stof met een hoge treksterkte van 300 tot 500 MPa – vezels als trekwapening in de kleigrond en verhinderen zij scheurvorming op macroscopische schaal. Testen hebben aangetoond dat door deze mechanismen de fysische (waterabsorptie en lineaire krimp) en mechanische (druk- en buigsterkte) eigenschappen van de aarde gevoelig worden verbeterd door een toevoeging van 2 a 3 m% koemest, en dit 'laat ons toe te concluderen dat [het grondmengsel met mest] toepasbaar is als bouw materiaal in vochtige klimaten'¹⁸². Andere dierlijke producten zoals bloed, urine en wei¹⁸³ werden ook gebruikt om het grondmengsel te stabiliseren tegen watererosie. In vele gevallen werden deze stoffen gebruikt voor een oppervlaktebehandeling, wat de wand bestendiger maakte tegen slijtage¹⁸⁴. Bovendien vertraagde het ureum in de urine niet alleen enigszins de droging van het mengsel, het reageerde samen met water ook tot een 'vettig huidje' aan de oppervlakte van de wand, dat vrij waterbestendig was¹⁸⁵.

Een grootschalig gebruik van dierenbloed en urine was in de meeste gevallen weinig waarschijnlijk, als wordt nagegaan hoeveel vocht er werd toegevoegd aan een grondmengsel dat nodig was voor een heel pand. Wat betreft de mest werd deze bedenking eerder ook al gemaakt. Wat wel frequent gebeurde is dat de ondergrond – na een winter lang te zijn uitgevroren – op de stalvloer werd verspreid, zodat ze door

171. Voor een wand van 8 cm dikte had men per 20 m² gemiddeld 1 m³ geschikte grond nodig (Vanros 1981, p17).

172. Eggen 1989, pp 106,107

173. Zo is de droge treksterkte van ongebakken aardestenen ongeveer 10% van haar druksterkte, voor aardemortels is dit 11-13 % (Minke 2006, p33).

174. Weismann, Bryce, en Main 2013, p53

175. Minke 2006, pp 40,47,48

176. Weismann, Bryce, en Main 2013, p53

177. Eggen 1989, p107

178. Weismann, Bryce, en Main 2013, p54

179. Minke (2006) beschrijft een proef, uitgevoerd door het Building Research Laboratory (BRL), Universiteit van Kassel, waarin verzadigde stalen ter grootte van een baksteen onder dezelfde omstandigheden (T: 23°C, RV: 50%) werden gedroogd aan de stilstaande lucht. Alle leemstalen droogden uit na 20 tot 30 dagen, terwijl baksteen, kalkzandsteen en beton na 100 dagen nog niet droog waren (Minke 2006, pp 29,42).

180. In dit onderzoek werd getest wat het effect is van het toevoegen van mest op de fysische (waterabsorptie en lineaire krimp) en mechanische (druk- en buigsterkte) eigenschappen van adobe (Millogo e.a. 2016). De adobe techniek bestaat erin aardestenen te vormen door middel van kneden of met een vorm, maar zonder ze te persen, en ze vervolgens te laten drogen aan de buitenlucht en de zon (Ardui e.a. 1996). Hoewel hier dus een andere techniek werd beschouwd dan het dichten van vlechtwerk, werd nog steeds hetzelfde materiaal onderzocht, namelijk een mengeling van ondergrond met mest, die in het productieproces niet is onderworpen aan chemische of fysische processen. Resultaten van dit onderzoek geven dus ook

hoeven van het vee grondig werd gemengd met het stro. Op deze manier is het aannemelijk dat er inderdaad een zekere hoeveelheid mest en urine doorheen de stroleem werd gemengd, maar ook dan zal het een fractie van het totaal zijn gebleven¹⁸⁶.

Over het gebruik van kalk in de aardewand bestaan verschillende opvattingen. Volgens Eggen (1989) werd de kalk in het mengsel toegevoegd en had ze 'een functie als bindmiddel, met als bijkomende eigenschap dat het de geur van de gebruikte urine enigszins neutraliseerde'¹⁸⁷. Het is niet duidelijk of met de kalk waarover hier sprake is gebluste of ongebluste kalk wordt bedoeld. In ieder geval werd de kalkbinder geproduceerd door de verbranding van kalkhoudende gesteenten¹⁸⁸ zoals mergel of van schelpen, waardoor calciumcarbonaat CaCO_3 in een endotherme reactie wordt omgezet tot calciumoxide – of ongebluste kalk – (CaO) en CO_2 ¹⁸⁹. Het kan zijn dat de ongebluste kalk werd toegevoegd in het grondmengsel, zodat het nadien toegevoegde water reageerde met de CaO tot calciumhydroxide – of gebluste kalk – Ca(OH)_2 . Indien er nog voldoende vochtigheid was, reageerden de calciumionen vervolgens met de metaalionen in de klei. Daardoor vormden zich sterke agglomeraties van kleine deeltjes die de indringing van water verhinderden¹⁹⁰. Bovendien reageert Ca(OH)_2 met CO_2 in de lucht, waardoor opnieuw de sterke kalksteen CaCO_3 wordt gevormd¹⁹¹. Schols (1958), Trefois (1979), Voskuil (1979) en Harris (2003) vermelden echter op geen enkele manier het inmengen van kalk in de aardewand. In dit geval werd kalkmortel gebruikt om de bovenste laag 'steenhard' te maken¹⁹². 'Sommige auteurs veronderstellen [echter] dat het aanbrengen van een beschermende laag vóór de 18e eeuw niet noodzakelijk was wegens de betere kwaliteit van de toen gebruikte stroleemspecie'¹⁹³. Het kalken of 'witten' van de lemen wanden, dat karakteristiek is geworden voor de vakwerken in Limburg en omstreken, gebeurde met 'natte' gebluste kalk¹⁹⁴, en vormde aan de buitenkant van de wand een wit, vettig laagje dat waterafstotend werkte en op den duur ook verhardde tot CaCO_3 . Wanneer het houtwerk in hetzelfde vlak lag als de wand werd het in sommige gevallen mee gewit, aangezien dit gemakkelijker was en op deze manier de zachtere houtsoorten tegen de inwerking van het weer werd beschermd. Zo hoefde men minderwaardig hout eveneens niet te teren¹⁹⁵ ter bescherming¹⁹⁶. Eggen (1989) wijst erop dat dit teren van houten onderdelen niet altijd een adequate behandeling was, want 'teer sloot het hout af, waardoor het niet meer kon ademen'¹⁹⁷. Dezelfde bemerking kan worden gemaakt bij het teren van de onderkant van de wand – vaak de stenen muurvoet. Volgens Schols (1958) diende deze teerlaag 'ter bescherming tegen het opspatten van dakdruppels', en ontstond er langs de buitenzijde 'een verweerd huidje [...], waarlangs het regenwater grif [afliep]'¹⁹⁸. Hoewel dit correct is, vergat men zo wel dat de stenen muurvoet langs één kant dampdicht werd gemaakt, en dit het uitdrogen van opstijgend vocht bemoeilijkte. 'Gebruikelijk en noodzakelijk was het wel om jaarlijks de nodige herstellingen te doen, daar anders het verval snel zou vorderen.'¹⁹⁹ Aangezien de hechting van deze lagen binnen afzienbare tijd danig was verminderd, diende

inzicht in dichtingen van vlechtwerk wanden vanaf de ijzertijd tot in de vroege 20e eeuw.

181. Voor de precieze samenstelling en deeltjesverdeling van de beschouwde grond uit Burkina Faso wordt verwezen naar (Millogo e.a. 2016). De grond bestond uit 43 m% zand, 17,5 m% silt en 36 m% klei, met de overige 3,5 m% grove deeltjes. Er kan dus worden gesproken van een grondsamenstelling die ook representatief is voor de Lage Landen.

182. Millogo e.a. 2016, p11

183. Wei is de vloeistof die overblijft na het stremmen van de melk.

184. Minke 2006, p41

185. Eggen 1989, p105. Eggen stelt dat dit 'huidje ontstond bij het naar buiten 'masseren' van het vocht in het stroleem-mengsel, gevolg van het gladduwen en -strijken van de vulling'.

186. Eggen 1989, p105

187. Ibidem.

188. De zuiverheid van de kalksteen is een bepalende factor voor het eindproduct. Voor pure kalkbinders is een zuiverheid van 90% vereist en één over 97% gewenst (Berge 2009, p86).

189. Berge 2009, p86

190. Uit proeven uitgevoerd door Vanros (1981) blijkt de kalkfractie een belangrijke factor te zijn voor de weerstand tegen (capillair opgezogen) vocht. Een te laag kalkgehalte lijkt daarentegen barstvorming in de hand te werken (Vanros 1981, p109). Kalk werkt overigens het best als stabilisator bij gronden met een hoog kleigehalte.

191. Minke 2006, p41

192. Trefois 1979a, p45

193. Vanros 1981, p35. Door deze auteurs wordt verondersteld dat wandopvullingen hiervoor veel waterbestendiger waren. De vraag kan worden gesteld of die

men ieder jaar zowel de kalk- als de teerlaag opnieuw op de wand te zetten.

Gezien de beperkte 'durability' van de wandafwerkingen - zij het een leemlaag of kalkpleister - volstonden ook de passieve beschermingen²⁰⁰ van de wand in het geval van te weinig onderhoud niet meer om de wand inwendig droog te houden - en bij gevolg werd de binnenkant dan ook nat. Daarom werd in sommige gevallen geopteerd om langs de buitenkant van de wand een extra bescherming te plaatsen, die als eerste barrière de impact van slagregen op de wand bufferde. Gewoonlijk werd hiervoor gebruik gemaakt van een schutsel van sprokkel- of rijsthout, ook soms van aardappelkruid of gedroogde bladeren, dat met behulp van een lattenwerk tegen de muur werd gezet (zie Fig.14). Al werden andere materialen gebruikt, de buitenste laag werd in dit geval op dezelfde manier opgeofferd aan de elementen als bij het bekalken, en elk seizoen moest ook deze afdekking worden vernieuwd²⁰¹. Duurzamer waren de wanden die door staande planken, bevestigd aan de vakwerkregels, werden afgedekt. Een ander meer duurzaam alternatief was het gebruik van strobosjes, waarvan de toppen in leem werden gedoopt en tegen de nog natte muur werden geplakt. De bossen kwamen dan over elkaar heen te liggen en werden gladgeschoren (zie Fig.15). In Limburg werden deze technieken tot de 20e eeuw toegepast op westelijke gevels²⁰².

betere kwaliteit iets te maken had met een 'bijzondere behandeling' van het grondmengsel dat werd gebruikt voor de afwerklaag.

194. Ongebluste kalk kan op een 'natte' en 'droge' manier worden geblust. Bij de natte methode wordt er iets meer water toegevoegd dan strikt noodzakelijk voor een volledige reactie, zodat de gehydrateerde kalk achterblijft als een vochtige kneedbare massa.

195. De teer in deze context duidt op houtteer of koolteer. Teer werd geproduceerd door het verhitten van hout of steenkool, zonder toevoer van lucht zodanig dat er geen verbranding optrad (Berge 2009, p418).

196. Voskuil 1979, pp 75,76

197. Eggen 1989, p112

198. Schols 1958, p24

199. Ibid.

200. Met 'passieve bescherming' worden de muurvoet en het overkragende dak bedoeld.

201. Trefois 1979a, p46

202. Voskuil 1979, p79



Fig.10:
Invulwand uit vlechtwerk

De lichthouten twijgen werden gevlochten doorheen de spijlen.



Fig.11:
Invulwand uit vlechtwerk

In dit geval bestond het vlechtwerk uit strobanden. De foto dateert van tijdens de wederopbouw van een boerderij in 1968.



Fig.12:

De aanbidding van het kind, door de Meester van Flémalle (1375 - 1444)

De spijlen zijn genageld op de regels, die achter de beleming verdwijnen.



Fig.13:

Detail van ruitvormig gevlochten strobanden, schuur in Hezingen



Fig.14:
*Vakwerkwallen in Lie-
dekerke*

*De wand die deels is af-
geschermd met hooi ligt
vermoedelijk op het noord-
westen, aangezien enkel het
deel dat het dichtst aan de
zuidwestelijke kant ligt werd
beschermd.*



Fig.15:
*Detail van een vak-
werkwallen in Slenaken*

*Links werd de wand afge-
werkt met dakpansgewijs
aangebrachte bosjes stro
die in de leem gedrukt zijn.
Rechts werd er gebruikt ge-
maakt van de klassieke kalk-
pleister.*

Ter recapitulatie werd in de vakwerkwand de opdeling tussen de dragende en scheidende functie van een wand tot het uiterste doorgedreven. Voor beide functies werden verschillende materialen gebruikt – stenen voor de muurvoet, hout voor het dragend skelet en de combinatie van kleinhout en een grondmengsel voor de invulling – waarbij deze materialen in de eerste plaats werden geselecteerd en vormgegeven op basis van een materiaal technische en economische logica, en de esthetiek van het geheel pas na de Industriële Revolutie aan belang won. Als eerste werd het vakwerk, houtskelet of de ‘timmer’ opgericht. Nadat de invulpanelen waren voorzien van een vlechtwerk, werd dit ‘beworpen’ met handteerbare volumes ‘stroleem’ met een hoog gehalte aan stro, langs beide kanten van het vlechtwerk²⁰³. De eerste basislaag die men op deze manier verkreeg, was ruw aan de buitenkant door uitstekende grove vezels en dus weinig geschikt voor de afwerking. Daarom werd vóór de eindafwerking en kort na het zetten van de eerste laag een laagje ‘geslipde leem’ op de wand gezet, wat bestond uit een fijnere grondsamenstelling en een kleinere fractie aan fijne vezels zoals haren of fijn hooi, en diende om de wand goed recht en glad uit te strijken. Een wand van 8 cm dikte moest 2 weken drogen om hard te worden²⁰⁴. Op deze laag kon de afwerkings- en bescherm laag worden gezet – wat overigens pas vanaf de 17e eeuw gebeurde en toen ook nog niet steeds – onder de vorm van een kalkpleister²⁰⁵.

In ieder geval werd er bij het construeren van de wand beroep gedaan op zeer veel ‘ongeschoolde’ mankracht²⁰⁶. Zeker de landbouwer kon ook overweg met het gereedschap dat werd gebruikt voor het maken en oprichten van het vakwerkskelet. ‘Tot in de [19e] eeuw nog was en bleef de boer zijn eigen bouwmeester. Bij hem berustte niet alleen de leiding, maar hij deed ook het meeste werk zelf. [...] Evenals de timmerman had ook hij een goede kijk op de gebruikelijke constructies’²⁰⁷. Ook het vullen van de wandpanelen en het gladstrijken van de buitenkanten – of het ‘klemen’ – was geen ambacht an sich en werd door de bewoners en hun kennissen zelf gedaan²⁰⁸. Toch kwamen er aan de verschillende fasen van de vakwerkbouw ook hoe langer hoe meer professionelen te pas. In de literatuur wordt vermelding gemaakt van ‘lemers’, ‘plekkers’ of ‘kleiplekkers’, die de kunst beheersten de slechte grond van de goede te scheiden. Ook worden rondreizende ‘boommakers’, ‘boomzagers’ of ‘kuilzagers’²⁰⁹, en het beroep van ‘timmerman’ of ‘schrijnwerker’ voor het eerst beschreven wanneer het vakwerk zijn intrede doet in de Lage Landen. Het lijkt wel voorbarig te concluderen dat bij de constructie van oudere wandopbouwen nooit ‘beroepsbouwers’ betrokken waren, het is immers pas wanneer het vakwerk zich had ontwikkeld tot dominante constructiewijze dat men begon te documenteren wie juist in het bouwproces betrokken was. Daarentegen zat ‘de essentie van de vakwerkconstructie [in] de verbinding met pen en gat’²¹⁰ en in al haar afgeleide en complexe houtverbindingen. Er is dus wel iets voor te zeggen dat samen met de ontwikkeling van het complexe houtskelet er zich noodgedwongen specialisaties in het bouwbedrijf voordeden.

‘Tussen het begin van het timmeren en het opzetten van het skelet lag in de regel vrij weinig tijd’²¹¹. Een huis kon 4 maanden na het ‘tekenen’ of afpalen van de constructie al zijn afgewerkt²¹². In ieder geval lijkt de winter een vaak voorkomend startpunt te zijn geweest voor het gros van de werken.

203. Vanros (1981) beschrijft de manier waarop in het openluchtmuseum Bokrijk aardewanden werden geconstrueerd. Eerst werd één kant van het vlechtwerk bezet met de leemlagen, en een dag later kon dezelfde werkwijze herhaald worden voor de andere zijde.’ Woonhuizen worden eerst langs langs binnen geleemd. Schuren worden soms gemakkelijks halve slechts aan de buitenkant geleemd. (Vanros 1981, p15) De manier waarop men in Bokrijk te werk ging in 1980, kan als representatief worden beschouwd voor oudere werkwijzen.

204. Vanros 1981, p15

205. Ibid., p16

206. Schols (1958) heeft het over ‘burenhulp’ (Schols 1958, p23). In veel literatuur wordt er een nauwe samenwerking tussen dorpsgenoten beschreven.

207. Schols 1958, p21

208. Trefois (1979) stelt dat het ‘klemen der wanden [...] vroeger het werk der vrouwen [was]’. Tegelijk ‘vormden de dorpsklemers of lemers [vaak] een gilde, kleemgilde genaamd’ (Trefois 1979a, pp 45, 61). Schols heeft het over de ‘buren en de buurmeisjes’ die meehielpen met de buitenafwerking. De (jaarlijkse) afwerking van de wand werd een ‘gezellige boel’ en droeg bij tot de ‘ware kermisstemming’ (Schols 1958, pp 24,25). Wat er ook mag zijn van de gender gebonden rolverdeling in het bouwproces, het bouwen van de wand was in ieder geval een werk van de gemeenschap, en het was op zijn beurt ook een vorm van gemeenschapsvorming.

209. Trefois 1979a, p39

210. Eggen 1989, p30

211. Ibid., p34

212. Eggen haalt als bron een contract aan over de bouw van huis in Lutterade, dat getekend werd op 3 januari 1652 en klaar was op 8 april (Eggen 1989, p34).

Zoals eerder geschreven was deze periode het meest geschikt om zwaar boshout te verzamelen, en tegelijk werd handig gebruik gemaakt van de vriestemperaturen om de te gebruiken ondergrond te laten uitvriezen. Indien het vakwerkskelet werd opgebouwd uit vers hout, moest er volgens Eggen (1989) na het vellen van de bomen snel te werk worden gegaan aangezien het gekapt hout binnen 6 weken verwerkt moest zijn²¹³. Trefois (1979) schrijft dat 'één winter vóór het richten van het huis [de] tronken of stammen in geriefhout – planken of stijlen – [werden] gezaagd', al is het hiermee niet duidelijk of hij het over de winter heeft waarop het voorjaar volgde waarin werd gebouwd, of over de winter dáárvoor. Wanneer er dan weer gebruik werd gemaakt van ongebakken aardestenen, voor de muurvoet of de schouw, werden deze gedurende de voorgaande zomer in de zon gedroogd, om tijdens de winter te worden opgeslagen²¹⁴. Tussen de eerste ontginningen en productie van materialen tot aan de eindoplevering leken er dus al snel 9 tot 12 maanden te hebben gezeten, wat evenwel geen bijzonder lange periode is.

De constructieve onderdelen in de vakwerkwand werden samengehouden tot een dragend skelet als een systeem van de pen-en-gatverbindingen. Dat er in het hele houtskelet op geen enkele manier gebruik werd gemaakt van natte verbindingen maar enkel met houten toognagels werd gewerkt, laat toe om een 'vakkundig getimmerd huis' te beschouwen als behorende tot de roerende goederen²¹⁵. Het huis verschildte in deze zin niet van andere bezittingen en het vervoeren ervan naar een andere plek was dus geen probleem²¹⁶. Men hoefde alleen de wanden te 'ontwegen' – of te ontdoen van haar vlechtwerk-invulling – en het strodak te 'ontdekken' alvorens het houten geraamte te demonteren. Juist dit was slechts mogelijk doordat de invulling slechts op mechanische wijze was bevestigd aan het skelet. Vaak werd dus een volledig huis of schuur ontmanteld, eventueel hersteld, en elders heropgebouwd, maar volgens Harris (2003) werden er vaker individuele balken en samengestelde kaders hergebruikt – in een minderwaardige toepassing weliswaar²¹⁷. Desondanks zijn er ook verschillende voorbeelden terug te vinden van hergebruikte onderdelen die opnieuw worden ingezet in een primaire rol – bijvoorbeeld als hoofdstijl. Bij het hergebruiken van oude balken waren er niet zelden al telmerken en verbindingssporen uit de vorige aanwezig. Dit maakt het relatief eenvoudig om het originele gebruik van zulke onderdelen te identificeren²¹⁸. Ook nadat de wand werd afgebroken, was het onderscheid tussen dragende en scheidende delen nog vaak duidelijk. De dragende onderdelen werden vormgegeven vanuit de logica van een relatief eenvoudige demontage en hergebruik. De invulling werd bijna steeds teruggebracht tot haar oorspronkelijke staat; de grond.

Pas toen gebouwen bakstenen muren kregen, werd het verhuizen niet meer mogelijk, en werden woningen achteraf als onroerend goed beschouwd. De 'verstening' van de wand, of het verdwijnen van het vakwerk, was een proces dat zich gedurende eeuwen langzaam voltrok. Volgens Voskuil (1979) begon deze vervanging al in de tweede helft van de 13e eeuw in het westen van Nederland²¹⁹. Toch werden er nog tot het midden van de 19e eeuw vakwerkwanden opgericht in Limburg²²⁰. Er worden stevast een aantal redenen aangehaald die aan de basis zouden hebben gelegen van deze shift, waarvan er enkele verbonden zijn aan de intrinsieke eigenschappen van de vakwerkwand. Ten eerste verbindt Voskuil lokale overgangen naar baksteen

213. Eggen 1989, p29

214. Schols 1958, p22

215. Trefois 1979b, p91

216. Trefois stelt dat deze mogelijkheid tot vervoeren dan ook werd uitgebuit. 'Het blijkt al direct uit het feit dat om met 'have en goed' te verhuizen, het betalen van een bepaald bedrag aan de landheer of aan het gemeentebestuur was vereist' (Trefois 1979b, p91).

217. Harris beschrijft het als 'reused in a lower-grade building or position' (Harris 2003, p19).

218. Harris 2003, p19

219. Voskuil 1979, p46

220. Eggen 1989, p12

met periodes van hoogconjunctuur in de landbouw en de accumulatie van kapitaal. Op zichzelf is de aanwezigheid van voldoende financiële middelen echter geen voldoende verklaring voor het fenomeen. Een andere reden is dat al meer; namelijk het schaarser worden van hout en de moeilijkheid om aan leem te komen. Het verdwijnen van het vakwerk wordt vaak toegeschreven aan de leegroof van de laatste grote bossen, en de competitie die tijdens de 16e en 17e eeuw floreerde tussen timmerlieden, scheepsbouwers en ijzersmelters²²¹. Ook ontstond er een gebrek aan geschikte ondergrond – het eerst natuurlijk in de stad – op het moment dat mensen zich wegens plaatsgebrek of voor andere redenen begonnen vestigen op locaties waar de ondergrond geen juiste samenstelling had. Voskuil maakt hieruit op dat leemgrond elders moest gekocht worden en dat gegeven lijkt beslissend. 'Pas als [een] gemeenschap voor wat ze nodig heeft moet betalen en de keus krijgt uit meer mogelijkheden, zijn de voorwaarden geschapen voor veranderingen'²²³. Dat op zo'n momenten werd gekozen voor de nieuwe baksteen, wordt dikwijls aan 2 zaken toegeschreven. Enerzijds is er het brandgevaar dat uitgaat van het houten vakwerk en de vezels in de wandinvulling. Dat dit een valabel argument is in stadswoningen waarbij de wandinvulling uit een grote fractie stro bestond en eventueel werd afgewerkt met een strodekking, hoeft geen betoog. Voor andere – meer dense – grondmengsels die werden beschermd door een kalklaag lijkt dit dan weer weinig terecht – voor de wandopbouw althans. Een intrinsieke eigenschap van de vakwerkwand was echter haar nood aan regelmatig onderhoud. Behalve het jaarlijkse werk aan de invulling, is het tevens denkbaar dat de schaarste aan hout van invloed was op de kwaliteit van de wanden, aangezien dit leidde tot het gebruik van zachtere houtsoorten, die veel meer onderhoud vroegen en een kortere levensduur hadden. Wanneer een kapitaalkrachtige sociale groep zodus besloot om te bouwen in het nieuwe materiaal dat al deze nadelen niet had, werd meteen de laatste reden geschapen voor de overgang van vlecht- en vakwerk naar baksteen; dat van de sociale druk. Er mag immers worden aangenomen 'dat stand en een lemen huis zich slecht met elkaar verdragen hebben in een tijd waarin de adel op het land in stenen huizen woonde en daaraan zijn aanzien ontleende'²²⁴. Zodus leidde het ene allicht tot het ander, dat weer een invloed uitoefende op het ene. In ieder geval werden in de 20e eeuw nog nauwelijks vakwerkwanden opgetrokken. 'De bouw van een houtskelet had opgehouden architectuur te zijn en was eenvoudigweg een element van de structuur geworden'²²⁵.

221. Men mag niet vergeten dat vóór de ontdekking van steenkool, het verkolen van hout tot houtskelet een zeer belangrijke bron was van brandstoffen voor allerlei productieprocessen.

222. Harris 2003, p83

223. Voskuil 1979, p48

224. Ibid., p49

225. Harris 2003, p83

De ambitie in het voorgaande deel was allerm minst om een sluitend overzicht te geven van de pré-industriële wandtechnieken in de Lage Landen. Er werd eerder beoogd een samenvatting te presenteren van courante bio- en geogebaseerde wandtechnieken, die werd gedestilleerd uit een literatuurstudie. De bevindingen en onderzoeksresultaten van auteurs met verschillende profielen en achtergronden werden naast en tegenover mekaar gezet, om op deze manier voor een aantal technieken de 'wat, waarom en hoe' in kaart te brengen. Uiteraard werd de representatie van alle informatie 2 maal beïnvloed door een persoonlijke visie en ideeën, éénmaal door de geraadpleegde auteur zelf, en andermaal tijdens het schrijven van de scriptie. Met dit in het achterhoofd, laat het voorgaande deel echter nog steeds toe een kwalitatieve inschatting te maken van de manier waarop men 'vroeger' bouwde. Het zou kort door de bocht zijn om te spreken over 'vroeger' tegenover 'nu', maar toch werd het bouwen ooit gekenmerkt door een absolute plaatsgebondenheid wat betreft materialen en werkkrachten, die lang vervlogen is. Frey (2010) vat het mooi samen als volgt²²⁶:

'First point: the construction industry, by rationalising and optimising its processes, at one and the same time renders them uniform and causes a massive displacement of the centre of decision-making. By the end of this process, the building site can no longer be described as the place where a building is produced. It is merely the place where components designed and built elsewhere are assembled.'

De hiervoor besproken wandopbouwen werden daarentegen gekenmerkt door de assemblage van componenten die tegelijk – relatief – in situ werden ontgonnen, verwerkt en ontworpen. De grondstoffen van de site en haar omgeving bepaalden de wand en stelden limieten aan de constructie. 'Wanneer men vervolgens terugdenkt aan de vele variaties in de constructie van de vlechtwerkwand sinds de steentijd waarvan hiervoor sprake is geweest, dan zouden die voor een belangrijk deel wel eens kunnen teruggaan op deze zelfde problematiek. De continuïteit zit in dat geval niet in de elkaar opvolgende technische oplossingen, maar in het zoeken van een oplossing voor eenzelfde probleem, telkens in een wat andere situatie. De technische oplossing is afhankelijk van die toevallige situatie, waarin de overgeleverde kennis slechts één gegeven is'²²⁷.

226. Frey 2010, p29

227. Voskuil 1979, p14

**Deel 2: Aarde als modern
bouw materiaal, een terugkeer
naar vroeger?**

De industrialisering van West-Europa was zich tijdens het begin van de 19e eeuw aan razendsnel tempo aan het uitbreiden. De echte verandering in de traditionele bouwpraktijk kwam met wat 'geïndustrialiseerd bouwen' zou kunnen worden genoemd: de introductie van staal en beton en de doorbraak van baksteen, en de daarbij behorende massaproductie van bouwmaterialen, door stoom aangedreven cirkelzagen, hoogovens, cementfabrieken, tot machinaal vervaardigde spijkers. Hoewel kan worden gesproken van een revolutie in de bouwwereld, schrijft deze industrialisering zich in een voortdurende zoektocht naar constructiesystemen die flexibel en arbeidsefficiënt waren, die de mens al voerde sinds hij sedentair werd. Zo maakte de beschikbaarheid van het machinaal verzaagde timmerhout en grote hoeveelheden goedkope spijkers het weinig economisch een vakwerkconstructie op te richten die bestond uit massieve elementen en houtverbindingen, wat de timmerman reduceerde van vakman tot arbeider. Wat Frey (2010) beschrijft als de 'uniformisering en rationalisering van constructieprocessen'²²⁸ werd daarmee een feit.

Volgens Dell Upton (1981) was de ware en meest diepgaande verandering die de geïndustrialiseerde bouw met zich meebracht echter niet het stroomlijnen van productie- en bouwprocessen, aangezien bouwlieden dit altijd al hadden gedaan en veel van de nieuwe constructievormen konden worden geïnterpreteerd als aanpassingen van de oude²²⁹. Het ware karakter van de revolutie was dat door de industrialisering het oprichten van een gebouw verschoof van het domein van de ambacht en zelfbouw naar dat van de industrie. De constructie van een vakwerkwand veranderde daarmee niet enkel in die van een baksteenmuur, maar werd ook in steeds mindere mate nog beheerst door noch de eigenaar van de wand als de werker zelf, door de arbeidsverdeling die toonaangevend werd in de bouw. De constructie van gebouwen en productie van materialen werden 2 verschillende aangelegenheden. Bjørn Berge²³⁰ onderscheidt 3 vormen van productie²³¹. Een product kan worden gemaakt door de gebruiker, gebaseerd op persoonlijke noden en vaardigheden en gewoonlijk in overeenstemming met de lokale culturele traditie. Ook kan het worden vervaardigd door een vakman die een fabricagemethode heeft ontwikkeld die steunt op ervaring. Ten slotte kan het worden gemaakt via een productie-ingenieur die direct of indirect, inclusief het gebruik van elektronica, de werkmans of machine informeert over de te nemen stappen in het productieproces. Wat de eerste 2 productievormen delen is dat zowel 'de geest van het product en de hand die het produceert' toebehoren aan dezelfde persoon. De derde vorm werd volgens Berge tijdens de Industriële Revolutie geïntroduceerd door fabrikseigenaars. De opzet van deze vorm was 'de slechte elementen onder de mensen uit te wieden'. Op deze manier verloor de werker de controle over het productieproces en werden ervaring en gevoel ingewisseld door machinerie, instrumenten en automatisering. Bijgevolg is 'werk' vandaag in de meeste gevallen omgevormd tot een vorm van professionalisering of specialisering. Maar traditioneel was werk echter niet slechts een middel om een doel te bereiken, zo stelt Berge, maar tevens een belangrijke activiteit van de gemeenschap en de menselijke geest: een leerproces van zelfrealisatie, communicatie en ontdekking²³².

Dat de industriële vooruitgang van de laatste eeuwen ook een milieutechnische keerzijde had werd tegen het einde van de 20e eeuw duidelijk²³³. De energiecrisis in 1973 toonde aan hoe afhankelijk de moderne industrielanden waren van een gestage

228. Frey 2010, p29

229. Upton 1981, p92

230. Bjørn Berge (geb. 1954) is een Noorse architect en onderzoeker. Zijn onderzoek en publicaties behandelen voornamelijk architectuur en de ecologie van de bouwpraktijk (eng: 'building ecology').

231. Berge 2009, p49

232. Ibid., p51

233. Soortgelijke inzichten werden echter ook al veel eerder geformuleerd maar daarom niet verspreid. Thomas Malthus voorspelde in 1798 het verband tussen bevolkingsgroei en uitputting van hulpbronnen, toen hij schreef dat "de kracht van de bevolking zo superieur is aan de kracht van de aarde om bestaansmiddelen voor de mens te produceren dat voortijdige dood op de een of andere manier het menselijk ras zal bezoeken." (Ashby 2013, p8)

Deel 2: Aarde als modern bouw materiaal, een terugkeer naar vroeger?

oliestroom voor hun voortdurende welvaart en levensstandaard: de grenzen van de groei en van de exploitatie van het milieu werden vastgesteld. E.F. Schumacher verklaarde in 1993 het volgende²³⁴:

'The crisis [...] will become worse and end in disaster, until or unless we develop a new lifestyle which is compatible with the real needs of human nature, with the health of living nature around us, and with the resource endowment of the world.'

Tot voor de Industriële Revolutie steunde de bouwindustrie voor het overgrote deel op hernieuwbare grondstoffen: aarde, hout, planten, beenderen en dierlijke vezels. De weinige niet-hernieuwbare grondstoffen – ijzer, koper, tin, zink – werden in zulke kleine hoeveelheden gebruikt dat de bronnen waaruit ze werden onttrokken in praktijk onuitputtelijk waren²³⁵. Stuk voor stuk verdrong het gebruik van niet-hernieuwbare grondstoffen echter dat van de hernieuwbare, tot – tegen het einde van de 20e eeuw – de constructiesector haar afhankelijkheid ervan bijna totaal was. Momenteel is het duidelijk dat enkele van de belangrijkste grondstoffen in de nabije toekomst uitgeput dreigen te raken²³⁶. De milieuproblematiek die de geïndustrialiseerde bouwsector veroorzaakt is dus in grote mate toe te schrijven aan het oververbruik van niet-hernieuwbare grondstoffen, maar niet ten minste aan de ontginning van stoffen die wel hernieuwbaar zijn. Het is immers de doorvoer van materialen in de moderne economie is die gekoppeld is aan grote energie- en milieubelastingen. De productie van bouwmaterialen, het onderhoud van gebouwen en de afbraak ervan na eindelevensduur, is samen met het operationeel energieverbruik van gebouwen verantwoordelijk voor 30 tot 40% van de globale uitstoot van broeikasgassen²³⁷. De CO₂ concentratie in de lucht is met 35 % toegenomen vanaf het begin van de Industriële Revolutie omstreeks 1750 tot 2005. De stijging in de afgelopen 10 jaar was de snelste in de voorbije 50 jaar²³⁸. Daarmee dragen bouwmaterialen voor een enorm deel bij aan de huidige opwarming van het klimaat.

*'The technology of mass production is inherently violent, ecologically damaging, self-defeating in terms of non-renewable resources, and stultifying for the human person. The technology of production by the masses, making use of the best of modern knowledge and experience, is conducive to decentralisation, compatible with the laws of ecology, gentle in its use of scarce resources, and designed to serve the human person instead of making him the servant of machines.'*²³⁹

Als gevolg van de dubbele problematiek omtrent de vervreemding van de bouwer ten opzichte van zijn gebouw, maar vooral de milieupact van hedendaagse materialenproductie, worden nieuwe visies ontwikkeld in het omgaan met bouwmaterialen en energie. Steeds staat hierin de aandacht centraal voor het beperken van de negatieve en het stimuleren van de positieve invloed van het bouwen op de menselijke geest en op het fysische milieu. De visie die aan de basis ligt van deze scriptie is die van een 'terugkeer' naar geo- en biogebaseerde constructievormen. In deze context wordt geo- en bioconstructie in bepaalde literatuur²⁴⁰ gepresenteerd als geworteld in een pre-industriële bouwtechniek en -economie, en als een duurzaam en noodzakelijk alternatief op conventionele constructie.

*'In this respect [over de uitputting van natuurlijke grondstoffen], building with earth, wood and plant fibres is one of the few techniques that needs no more than the sun's energy. Earth dries in air and can be re-plasticised and reshaped through the addition of water, and wood and plant fibres have a net zero carbon footprint²⁴¹. The building technology is simple and available to everyone, and uses raw materials that can be found almost everywhere in relevant quantities without requiring energy-intensive pre-processing.'*²⁴²

234. Schumacher 1993, in 'Small is beautiful: A Study of Economics As If People Mattered', geciteerd door Volhard 2015, p31

235. Ashby 2013, p6

236. Dit geldt in het bijzonder voor de fossiele brandstoffen aardgas en aardolie, en (edel)metalen zoals goud, zilver, lood en zink (Berge 2009, p3).

237. Berge 2009, p32

238. Schroeder 2016, p22

239. Schumacher 1993, in 'Small is beautiful: A Study of Economics As If People Mattered', geciteerd door Volhard 2015, p31

240. De argumenten die in dit deel wordt voorgesteld zijn de argumenten van Volhard (2015), Schroeder (2016) en Berge (2009).

241. De koolstof voetafdruk (eng: 'Carbon footprint' of 'embodied carbon'), is de hoeveelheid CO₂ die tijdens de hele levenscyclus voor en door een materiaal wordt geproduceerd (zie onderdeel 'Duurzaamheidsevaluatie').

242. Volhard 2015, p32

*'Earth building offers many ways in which people can bring their own ideas and skills [and time] to bear, either in the making of earth building materials on site, or in using ready-made earth building materials. [...] One must, of course, observe the material-specific technical particularities, but with adequate knowledge, experience as well as care in the planning and undertaking of building works, there is no reason not to exploit the advantages of this obvious and readily available material.'*²⁴³

Ook geven Volhard (2015) en Berge (2009) andere, meer bouwtechnische redenen om geo- en biomaterialen te gebruiken.

*'Earth, straw and wood are all natural building materials that are non-toxic both during and after installation. [...] The working method is easy to learn and easy to undertake oneself. Only a few simple tools are required. [In earthen infill applications], self-build work is restricted to the panel infill and therefore cannot endanger the structural stability of the building. Errors are generally easy to correct.'*²⁴⁴

*'[Earth construction] requires far less energy than is needed for concrete and fired brick buildings.'*²⁴⁵

*'If it is carried out correctly, it has a long life expectancy.'*²⁴⁶

*'It provides good indoor climate due to its temperature and moisture regulating properties.'*²⁴⁷

De esthetische kwaliteiten van aardebouw worden door Schroeder (2016) samengevat als volgt:

*'Earthen structures blended well into the landscape and shaped the picture of rural regions and urban settlements over the centuries. [...] Other popular aspects are the sensual characteristics of building elements, such as unusual textures as well as pleasant tactile surface qualities and a wide range of colours. These add to the desirability of earth as a building material.'*²⁴⁸

Over de karakteristieken van geo- en biomaterialen op het einde van de nuttige levensduur van een gebouwelement wordt het volgende geschreven:

*'Timber and earth constructions [...] are easily adapted and converted to new uses, and the majority of its constituent building materials can be re-used or recycled.'*²⁴⁹

*'Today, many building materials are already termed sustainable if it is technically possible to recycle them, irrespective of the fact that shredding and melting down are energy-intensive processes that are also dependent on the continued availability of fossil fuels. Earth and wood, by contrast, can be reused again and again with minimal energy requirement and when no longer needed can be returned to nature without harming people or nature.'*²⁵⁰

*'"Recycling" of the buildings did not pose any problems: earth building materials could be reused indefinitely or could be returned to the natural cycle without harming the environment.'*²⁵¹

Er bestaat een range aan geo- en biogebaseerde materialen die vandaag reeds als bouw materiaal worden toegepast in West-Europa, hoewel de meesten hiervan zich slechts in de marge van de bouwpraktijk bevinden. De bouwmaterialen kunnen worden opgedeeld in dragende materialen, invulmaterialen en afwerkingsmaterialen. De groep dragende materialen wordt opgedeeld in constructiehout en dragende

- 243. Ibid.
- 244. Ibid., pp 39-40
- 245. Berge 2009, p123
- 246. Ibid.
- 247. Ibid.
- 248. Schroeder 2016, pvii
- 249. Volhard 2015, p10
- 250. Ibid., p32
- 251. Schroeder 2016, pvii

geomaterialen. Op de toepassing van hout in een draagstructuur wordt hier niet verder ingegaan²⁵². De belangrijkste technieken waarin geomaterialen in een dragende toepassing worden gebruikt zijn stamperde (eng: rammed earth) en ongebakken aardestenen (adobe of geperste stenen). Bij stamperde wordt vochtig en voorbereid²⁵³ aardemateriaal, meestal vermengd met natuurlijke vezels in lagen tussen 2 bekistingsplaten gestort en met grote kracht aangedamd, om zo een continue en monolithische wand te bekomen. Het werkingsprincipe van ongebakken aardestenen is gelijkaardig aan dat van baksteenmetselwerk, behalve dat er gebruik wordt gemaakt van kalk- of kleigebaseerde mortels. De adobe techniek bestaat erin leemstenen samen te stellen door kneden of vormen in een mal, zonder ze te persen. Bij de geperste stenen wordt de aarde in de mal mechanisch of handmatig geperst. Om bruikbaar te zijn als dragend materiaal, moet een aardemengsel een massadichtheid hebben die hoger ligt dan 1700 kg/m³.²⁵⁴

Niet-dragende geo- en biogebaseerde invulmaterialen zijn strobalen, stroleem, 'lichte' aarde²⁵⁵ en kalkhennep. Doordat deze materialen de ruimte tussen een dragend skelet opvullen dienen zij meteen ook als isolatiemateriaal. Strobalen worden als bouwstenen gestapeld en aangeporst tot een solide wandinvulling. Stroleem is een mengeling van zeer vochtige bouwdeurde met versnipperd stro. Deze 'pap' wordt tussen de draagstructuur in een bekisting aangebracht. De massadichtheid van de uitgedroogde muur is sterk afhankelijk van de gebruikte hoeveelheden stro en aarde. 'Lichte' aarde is een vormloos mengsel van bouwdeurde, organische en/of lichtgewicht minerale toeslagstoffen, en water. Het kent verschillende toepassingen als bouwdeurde: als opvuldeurde voor vakwerk- of houtskeletbouw (met name voor buitenmuren en als voering) als aarden vulling van houten balkenplafonds, als pleisterlaag, of voor het maken van gevormde leemstenen en panelen. Kalkhennep is een zuiver isolatiemateriaal dat bestaat uit hennepscheven die worden gebonden tot een uitgeharde massa door de toevoeging van kalk en water. Op dit materiaal wordt verder uitvoerig ingegaan.

Er ontstaat steeds meer interesse in aarde-gebaseerde bouwmaterialen en -technieken, zowel vanuit bouwdeurden als producenten en aannemers. Deze laatste in het bijzonder hebben de mogelijkheden om technieken op grotere schaal toe te passen, door hun kwalificaties en toegang tot professionele apparatuur, en zijn op die manier in de positie om technieken verder te ontwikkelen. Geo- en biomaterialen worden – vaak door de bouwdeur zelf – aangewend in buitenwanden voor hun ecologische en esthetische eigenschappen en hun gunstige invloed op het binnenklimaat. Door deze 'oude' en tegelijk nieuwe materialen te gebruiken, hoopt men aldus een tegengewicht te bieden aan de schadelijke neveneffecten van de geïndustrialiseerde bouwdeurld.

252. De geïnteresseerde lezer wordt doorverwezen naar (Berge 2009), (Bot 2009) of (Ashby 2013).

253. Zie onderdeel 'A8. Basis leempleister'.

254. Volhard 2015, p13

255. Voor meer informatie wordt verwezen naar (Schroeder 2016, pp 157 – 193).

Deel 3: Geo- en biogebaseerde wanden in kaart gebracht

In deel 3 van de scriptie wordt een evaluatie gemaakt van moderne geo- en biogebaseerde wandtechnieken. Het bestaat uit 2 onderdelen. Het eerste deel betreft een kwalitatief onderzoek naar productieprocessen en bouwwijzen, uitgevoerd als een casestudie van 4 hedendaagse Belgische geo- en biogebaseerde buitenmuren in residentiële laagbouw. In het tweede deel wordt een kwantitatieve berekening gemaakt van de duurzaamheid van de desbetreffende wanden, door de opdeling te maken in 'durability' en 'sustainability'. Het doel van de casestudie is enerzijds een selectieve berekening te maken van milieutechnische duurzaamheid van 4 moderne wandconstructies, en de resultaten zowel onderling als met een gekozen referentiemuur te vergelijken. Anderzijds is het hoofddoel van deel 3 om op een kwalitatieve manier een beeld te scheppen van de materiaalstromen en productieprocessen die aan de basis liggen van moderne aardebouw. Hoewel de structuur van delen 1 en 3 inherent anders is opgevat, kunnen de resultaten van beide kwalitatieve onderzoeken naast elkaar worden gelegd. Dit maakt het mogelijk om aan de hand van een buitenwandconstructie het begrip de milieutechnische voordelen van geo- en biogebaseerde constructie, die werden besproken in deel 2, te nuanceren en contextualiseren.

Caseselectie: het verhaal van 4 moderne buitenmuren

In het volgende onderdeel worden vier cases toegelicht die elk een voorbeeld vormen van een moderne geo- en biogebaseerde buitenwand. Dit onderdeel is het verslag van een kwalitatief onderzoek naar constructiemethodes en productieprocessen van bouwmaterialen in de Belgische context. Om te beginnen wordt per wand een beschrijving gegeven van de constructie en het constructieproces, gevolgd door foto's en een typedoorsnede van de wand. Ter informatie wordt ook steeds een detailtekening gegeven van de muurvoet van de wand²⁵⁶. Vervolgens wordt voor elk materiaal dat aanwezig is in de wandopbouw het desbetreffende productieproces in kaart gebracht. Zo wordt per materiaal een flowchart²⁵⁷ opgesteld, waarin telkens de verschillende deelprocessen en directe en indirecte grondstoffen²⁵⁸ worden onderscheiden. Voor de meeste deelprocessen was het van belang deze nauwgezet te beschrijven, om tot een goed inzicht te komen van de verschillende stappen die natuurlijke grondstoffen moesten doorlopen om als bouwmaterialen ingezet te kunnen worden in de vier beschouwde buitenwanden. Waar informatie beschikbaar was, worden transportafstanden weergegeven op kaarten doorheen de tekst. Bij wijze van afbakening van het onderzoek worden de wanden bestudeert als 'typische vierkante meters m²'. Er zullen dus geen beoordelingen worden gemaakt van de volledige woningen waar de wanden deel van uitmaken, of van vloer- of dakaansluitingen.

De vier wanden (A, B, C en D) zijn twee kalkhennepwanden, een stroleemwand en een strobalewand. Gezien het nog relatief beperkte scala aan 'natuurlijke' bouwmaterialen die courant worden toegepast, is het niet verwonderlijk dat, hoewel de wanden grotendeels uit andere componenten bestaan, er toch enkele materialen – of zeer gelijkaardige varianten – in meerdere wanden worden aangewend. Dit geldt ook in het bijzonder voor materialen die onderling verschillen, maar waarvan

256. De bescherming tegen opstijgend vocht is dan ook kritiek bij geo- en biomaterialen.

257. Dit is een flowchart van het productieproces, hier wordt geen aanduiding gemaakt van transportafstanden. Op de flowchart wordt waar mogelijk een aanduiding gegeven van de gebruikte hoeveelheden. Van het eindproduct wordt het gewicht gegeven dat werd gebruikt in de muur, de samenstellende delen worden in volumedelen uitgedrukt.

258. De materialen die in het overzicht worden opgenomen dienen als directe of indirecte grondstoffen van het eindproduct. Met directe grondstoffen worden die stoffen bedoeld die effectief deel zullen uitmaken van het eind-

enkele samenstellende delen in grote mate gelijkaardig zijn²⁵⁹. Het is daarom dat doorheen dit deel hoe langer hoe meer zal worden verwezen naar eerder uiteengezette productieprocessen. Materialen waarvoor dit in het bijzonder geldt zijn hydraulische kalk en hydraatkalk. Beiden worden als bindmiddel aangewend in alle pleisters, en in kalkhennep. Het wordt in dit onderdeel duidelijk hoe kalk van essentieel belang is voor de samenstelling van geo- en biogebaseerde wandopbouwen, en er zal bijgevolg dus ook uitvoerig op worden ingegaan. Een andere kanttekening is dat bevestigingsmiddelen²⁶⁰ ter vereenvoudiging niet als aparte materialen in de analyse worden opgenomen, aangezien het niet mogelijk bleek de werkelijk gebruikte artikelen te achterhalen. Ten slotte werd informatie over de constructiemethode verkregen bij de eigenaars van de bestudeerde woningen, indien niet anders vermeld.

De opzet in dit deel is niet om een inzicht te bieden in de mechanische, fysische of chemische materiaalparameters van grondstoffen die worden gewijzigd doorheen de ontginning en verwerking tot bouw materiaal om zo de eigenschappen van het eindproduct te bepalen. De opzet is wel om voor vier concrete en gerealiseerde wanden een overzicht te scheppen van de nodige bewerkingsprocessen die aan de basis liggen van de aangewende bouwmaterialen. Op deze manier wordt duidelijk hoe materialen die in wezen 'natuurlijk' zijn, niet zomaar kunnen dienen als bouwmaterialen zonder eerst verschillende takken van de industrie te doorlopen, en waar in de productieprocessen de notie van 'sustainability' voor geo- en biomaterialen moet worden genuanceerd.

product. Met indirecte grondstoffen worden energievormen bedoeld die worden aangewend om productieprocessen mogelijk te maken.

259. Als voorbeeld worden materialen A3 (leemprimer) en C1 (kalkcementpleister) aangehaald, waarin de fractie aan leemgrond in beide materialen dan wel van een geheel andere afkomst en samenstelling is, maar de ontginning en verwerking ervan zeer gelijkaardig wordt aangenomen.

260. Dit gaat over mechanische bevestiging. Nagels, schroeven en nietjes vallen buiten de analyse.

Wand A: Kalkhennep in nieuwbouw, Eksaarde

De eerste wandopbouw maakt deel uit van de buitenwand in een heropgebouwde langgevelhoeve in Eksaarde²⁶¹ (zie Fig.16). Er kan niet worden gesproken over een renovatie, aangezien er behalve het volume en een deel van de bakstenen binnenmuren weinig is behouden van het oorspronkelijke gebouw. Ook de oude bakstenen buitenmuur werd in 2012 vervangen door een niet-dragend houtskelet²⁶² (A6), opgevuld met kalkhennep (A5) als isolatiemateriaal. Als buitenafwerking werd een kalkpleister (bestaande uit A1 en A3) toegepast. Op plaatsen waar een voldoende grote dakoversteek kon worden gerealiseerd – wat meestal het geval was (zie Fig.17), is de eigenaar uiteindelijk van plan langs de buitenkant nog een gekleurde leemfinish laag te zetten. Aangezien deze laag nog niet werd aangebracht en enkel een esthetische rol zou vervullen werd ze niet in de analyse opgenomen. Enkel aan de buitenmuren aan de 4 dakterrassen zou deze leemfinish niet worden aangebracht (zie Fig.18), aangezien een dergelijke dakoversteek daar niet mogelijk was.

Ter verduidelijking van de opbouw wordt verwezen naar Fig. 19. Een detail van de muurvoet is getekend in Fig. 20.

Na het storten van de betonnen strookfundering en het metselen van de cellenbeton, werden de houten stijlen (A6) en regels in situ op maat gezaagd en het houtskelet in elkaar gezet. De stijlen werden in een onderregel geschroefd die op zijn beurt in het cellenbeton zit verankerd. Aan de buitenkant van het skelet werden er 80mm dikke houtvezelplaten (A4) bevestigd met houtschroeven, die met ca. 30 cm tussenafstand door de platen in de stijlen werd geschroefd. Doordat de platen in elkaar haken met een tand-en-groefstelsel en ze worden gestapeld in een halfsteens verband, wordt het houtskelet extra verstijfd door de daarop bevestigde houtvezelplaten. Maar bovenal dienen de platen als isolatiemateriaal, en is hun oppervlak geschikt als basis voor de buitenpleisterlagen. Langs de binnenkant werd deze basis gecreëerd door tegen de houten stijlen wilgenmatten (A7) te nieten. Op deze manier werd het houtskelet langs beide kanten 'gedicht', en kon het worden opgevuld met kalkhennep vlokken (A5), die het meest bijdragen aan de thermische isolatie. Dit was een manueel proces waarbij de droge vlokken langs buiten aan de bovenkant van de wand in de holtes van het skelet werden geschept met een emmer, en vervolgens licht werden aangestampt²⁶³. Als afwerking werd de buitenkant van de wand om te beginnen bezet met een 4mm dikke hechtpleister (A3). Ter versteviging werd in de net aangebrachte pleister een kunststof wapeningsnet gedrukt (A2). Ten slotte werd de eigenlijke buitenpleister op de droge hechtlaag gezet: de 10mm dikke basislaag kalkpleister (A1). Langs de binnenkant werd gewerkt met leempleisters. Eerst en vooral werd een 20mm dikke basisleempleister (A8) in 2 lagen op de wilgenmatten gezet. Nadien werd, gelijkaardig aan de buitenpleister, een wapeningsnet in de nog natte pleister gedrukt. Zo werd een stabiele ondergrond bekomen voor de afwerkingslaag. Deze afwerkingslaag (A9) bestaat uit een grotendeels gelijke leempleister, enkel de kleifraction heeft een andere kleur uit esthetische overwegingen.

Hoewel de eigenaar sterk betrokken was in het ontwerpproces, werd in het

261. De contactpersoon en eigenaar van de woning is Sven Bullaert.

262. De woning bestaat uit een benedenverdieping en een zolderverdieping. De verdiepingsvloer wordt gedragen door de binnenmuren en de portieken die het dak dragen in de dubbelhoge leefruimte steunen op stalen kolommen in de buitenwand. De buitenmuur draagt enkel zichzelf.

263. De hennepvlokken werden aangestampt om zettingen te vermijden die na verloop van tijd zouden optreden in het materiaal indien het niet zou worden verdicht. Op deze manier zouden er niet-geïsoleerde holtes ontstaan in de bovenkant van de muren, met een koudebrug als gevolg.

264. Om dit te kunnen doen kon de muur uiteraard niet meteen tot de bovenkant worden afgewerkt met houtvezelplaten (hoogte 600mm), maar gebeurde dit trapsgewijs. De bovenste rij platen werd pas op het laatste moment tegen het skelet gezet, maar ook dan nog was er een open strook van ca. 10cm voorzien om dit laatste stuk op te vullen met kalkhennep. Op deze manier kon het laatste deel echter niet meer worden aangedrukt. De open strook werd opgevuld met houtwol en afgewerkt met een stuk gezaagde vezelplaat.

geval van wand A niet aan zelfbouw gedaan. Het houtskelet werd geplaatst door het aannemingsbedrijf Portier Renovatiewerken uit Houthulst. De houtvezelplaten en wilgenmatten werden op het skelet gemonteerd door hun respectievelijke verdelers: Houthandel De Groote in Lokeren en Riethandel Jos Van Rees uit Genemuiden, Nederland. De kalk- en leempleisters werden door het stukadoorsbedrijf Georgan van Geert De Jonghe aangebracht met een spuitmachine, een elektrisch apparaat dat de pleister met luchtdruk tegen de wand spuit. Met deze machine kan snel worden gewerkt, maar het spuiten van een pleister vereist veel voorbereidend werk en behoorlijk wat mankracht. Alvorens het zetten van de kalkpleisters waren 3 werknemers van Georgan 'een kleine dag' bezig met het plaatsen van folies om de onderkant van het strodak enerzijds, en het buitenschrijnwerk anderzijds af te dekken, zodat vervuiling door pleisterspatten werd vermeden. Het zetten van de hechtalkpleister (A3) kostte 2 werkdagen aan 3 werknemers. De basislaag nam iets minder tijd in beslag, zo'n 1,5 werkdagen, aangezien in deze laag geen wapeningsnet moest worden geduwd. Op deze manier toont een eenvoudige berekening dat de kostprijs in tijd van de buitenpleister van wand A – minstens en ongeveer – 0,65 manuren/ m² of 40 min/ m² is²⁶⁵. De tijdsduur van het pleisterwerk aan de binnenzijde – dat als laatste werd gedaan – is vergelijkbaar, maar dit werd uitgevoerd met 4 tot 5 werknemers²⁶⁶. Bovendien dienden tussen het zetten van de verschillende lagen de droogtijden te worden gerespecteerd. Beiden zijn het gevolg van een verschillende pleistersoort en de grotere laagdiktes. Zo werd de 1e laag basisleempleister (A8) in 1 keer gezet voor het hele interieur, een werk dat 'een aantal dagen' in beslag nam. Nadat deze laag noodzakelijkerwijs gedurende deze periode was gedroogd tot een 'aardvochtige' vochtigheid, werd hetzelfde proces herhaald voor de 2e laag basispleister. Het volledig uitdrogen van de basisleempleister nam echter '2 à 3 weken' in beslag, nadien kon de leemfinish pas worden aangebracht²⁶⁷. Een relevante inschatting van benodigde manuren per m² is voor de binnenpleister niet mogelijk, aangezien de oppervlakte aan binnenmuren niet geweten is en bepaalde ruimtes werden afgewerkt met een kalkpleister, maar een gelijkaardige snelheid van werken is aannemelijk²⁶⁸.

265. Voor deze berekening werd gerekend met een werkdag van 8 uur. De bepleisterde buitenwanden zijn samen 79,5m lang en ong. 2,8m hoog. Het percentage aan openingen (niet-bepleisterd) wordt geschat op 30%. In deze berekening zijn echter geen overige voorbereidingswerken of opruim meegenomen.

266. 1 persoon voedt pleister aan de machine, 1 persoon spuit en 2 personen strijken de pleisterlaag af. Voor de 2e laag basisleempleister was er een 5e persoon nodig om aansluitend met het afstrijken van de pleister het wapeningsnet in de pleister te duwen en af te snijden (De Jonghe 2022).

267. Bij deze tijdsinschatting ging de pleisterwerker ervan uit dat hij de pleisterwerken in de zomermaanden – met hogere temperaturen en een snellere droging tot gevolg – had uitgevoerd, wat hij zich niet precies kon herinneren.

268. De beschreven tijdsduren en het daaruit berekende aantal manuren per m² hebben enkel betrekking op de typische m² en houden geen rekening met de complexiteit van woning A wat betreft de pleisterwerken. Zo diende bv. op vele plaatsen (schuin plafond, aansluiting van het plafond op de muur, oude bakstenen binnenmuren,...) ter voorbereiding nog een ondergrond van steengas te worden aangebracht, om bepaalde vormen te kunnen realiseren (De Jonghe 2022). Dit was een zeer tijdsintensief onderdeel van het werk maar wordt dus niet in rekening gebracht.



Fig.16:
Wand A: context

Wand A maakt deel uit van de buitenmuur van een heropgebouwde langgevelhoeve in Eksaarde.

Rechts op de foto, verscholen achter de takken, is een dakterras te zien.



Fig.17:
Wand A: dakoversteek

Aangezien het buitenoppervlak van wand A in de toekomst wordt afgewerkt met een leempleister, was een aanzienlijke dakoversteek vereist als bescherming tegen de regen.

Dit deel van de muur werd gebruikt om leemafwerkingen met verschillende kleuren op te testen. De vochtplekken zijn te wijten aan inwendige condensatie door een plaatselijke constructiefout.

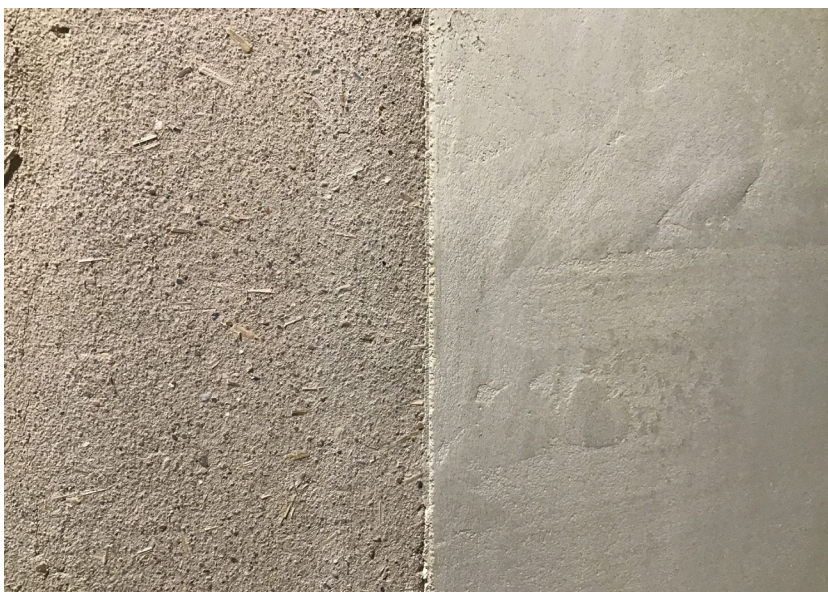


Fig.18:
Wand A: detail van verschillende afwerkingen

Links op de afbeelding is de leemafwerking te zien zoals toegepast op wand A. De rechterhelft toont een kalkpleister als afwerking.

Fig. 19:

Wand A type m2

buiten

Buitenpleister

- | | |
|---------------------------|-------|
| 1. Basislaag kalkpleister | 10mm |
| 2. Wapeningsnet | |
| 3. Hechtkalkpleister | 4mm |
| 4. Houtvezelplaat | 80mm |
| 5. Kalkhennep | 240mm |
| 6. Houtskelet | 240mm |
| 7. Wilgenmat | 10mm |

Binnenpleister

- | | |
|-----------------------|---------|
| 8. Basis leempleister | 2x 10mm |
| 9. Leemfinish | 10mm |

binnen

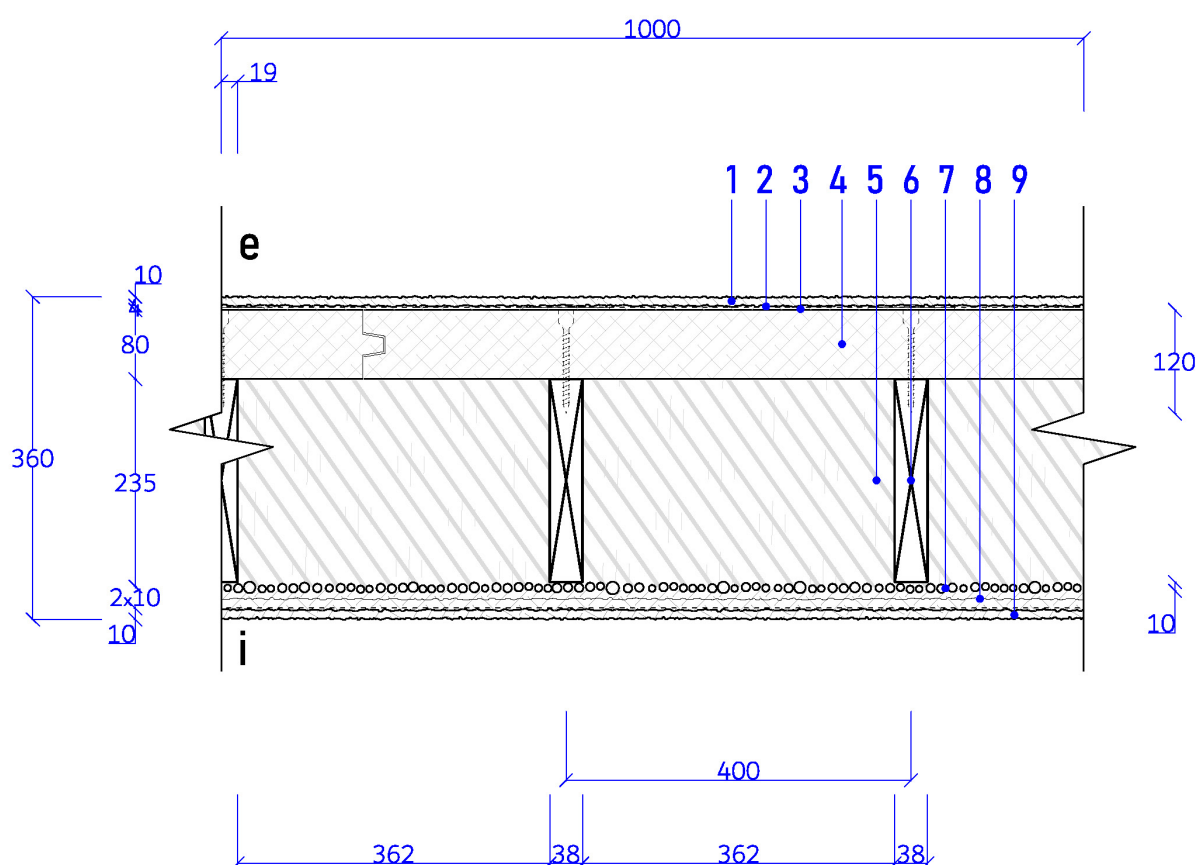


Fig. 20:

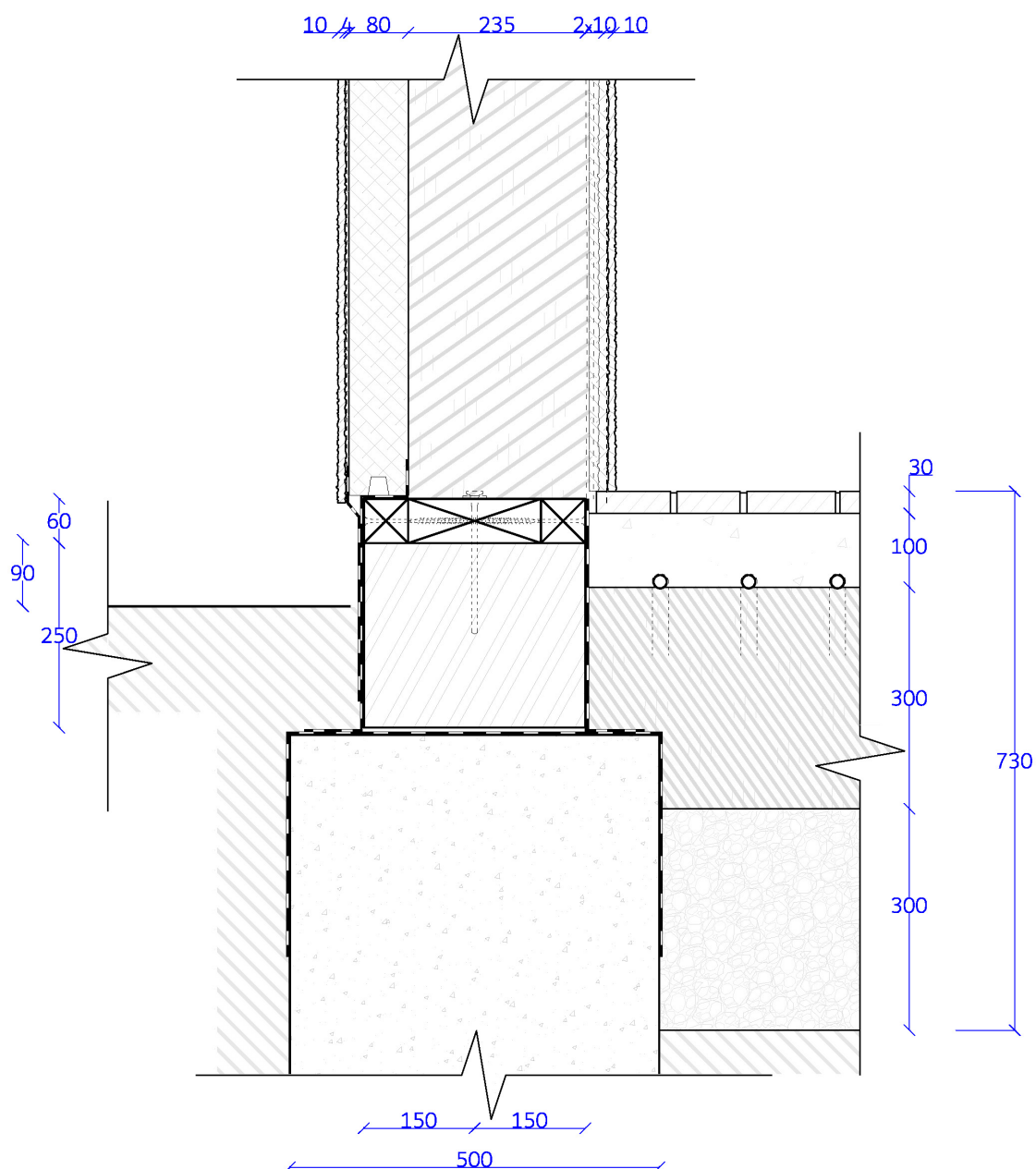
Wand A muurvoet

Vloeropbouw

binnen

Geslepen keien	30mm
Kalkchape	100mm
Kalkhennep verdicht	300mm
Schelpen	300mm

bodem



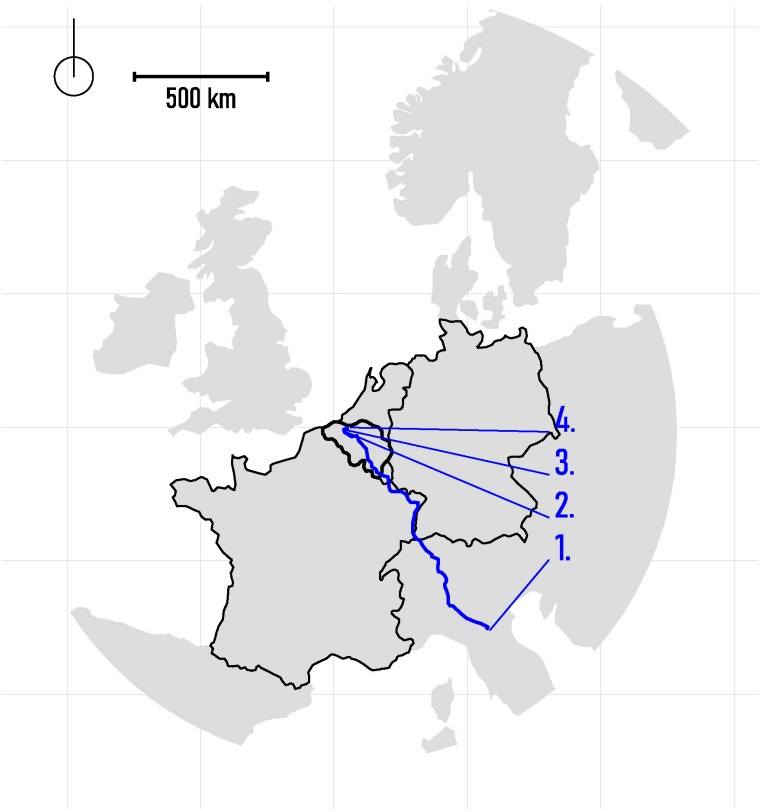
A1. Basislaag kalkpleister

Algemeen

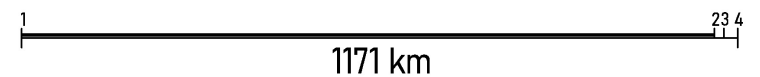
Wand A is momenteel langs buiten afgewerkt met wat door de betrokken pleisterwerker een ‘basislaag kalkpleister’ wordt genoemd. Deze kalkpleister is van het type **Biocalce® Zoccolatura** en werd op de werf geleverd in voorverpakte zakken van 25kg, als mengeling van hydraulische kalk, 2 soorten kwartszand, fijne kalksteengranulaten, en een puzzolaan²⁶⁹. Per zak werd ongeveer 5 liter water toegevoegd. De pleister werd gezet door het bedrijf Georgan maar de mengeling werd gekocht bij de verdeler Ecostore, die het product op zijn beurt aankoopt bij de Italiaanse fabrikant Kerakoll.

Aangezien er over een ‘basislaag’ wordt gesproken, dient deze laag normaal dan ook niet als eindafwerking, maar als ondergrond voor een esthetische kalkfinish. Het is echter enkel de massa van de stabiele basislaag die de muur beschermt tegen de weersinvloeden²⁷⁰. Hierbij stroomt regenwater gedeeltelijk af langs de pleister, maar wordt een deel ook onvermijdelijk geabsorbeerd in de poreuze structuur. Door het vochtregulerend vermogen van de kalkpleister en haar dampopen karakter, wordt opgenomen vocht nadien opnieuw afgestaan aan de buitenlucht²⁷¹.

Op onderstaande kaart is het transport voorgesteld vanaf de fabriekssite van Kerakoll.



1. Sassuolo, IT 2. Melle, BE 3. St-Amandsberg, BE 4. Eksaarde, BE



Biocalce® Zoccolatura*	
L x H x B [mm]	nvtxnvtx10
ρ [kg/m3]	~ 1420
Treksterkte [N/mm2]	nvt
Druksterkte [N/mm2]	nvt
λ [W/mK]	0,3
c [J/kgK]	~ 1000

* Alle waarden werden bekomen uit (KERAKOLL S.p.a. 2015).

269. KERAKOLL S.p.a. 2015

270. Naast de beschermende functie van de pleister, is de gezette hoeveelheid ook van belang om een goede ondergrond te vormen. Hoe dikker de basislaag, hoe gemakkelijker het water van de finish geleidelijk aan kan indringen en stabiel kan drogen, wat een mooiere afwerking toelaat (De Jonghe 2022).

Fig.21: Transport: basislaag kalkpleister

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

271. De Jonghe 2022

Productie, kwartzand (zie Fig.26)

Het grootste deel van het eigenlijke 'skelet' van de basislaag wordt gevormd door 3 delen inert **kwarts- of siliciumzand**, per deel hydraulische kalk. In het pleistermengsel zitten 2 soorten zand: één met een korrelverdeling (0,1-1 mm) en een nog fijner zand met korrelverdeling (0,1-0,5 mm). Beiden zijn gewassen en beiden werden gewonnen in een rivier²⁷², in zeer gelijkaardige processen. Kwartszand is een fijnkorrelig, wit, uiterst zuiver zand met een laag ijzergehalte, en bestaat bijna geheel uit kwarts (SiO₂). De ontginning van rivierzand berust op **fossiele brandstoffen** voor **baggerinstallaties, graafmachines** en **scrapers**²⁷³, op **gemechaniseerd transport (diesel)** en op **elektriciteit** en **water** voor het 7 en spoelen van het zand²⁷⁴.

De grootschalige zandwinning voor de constructie industrie uit rivieromgevingen gebeurt wereldwijd. De winning van dit granulaat is dan ook onvermijdelijk aangezien de bouwsector er in grote mate afhankelijk van is. Ri4 sedimenten kunnen afkomstig zijn uit een rivierterras of uit de bodem van een actieve stroom, en er zijn verschillende manieren om ze te ontginnen²⁷⁵, zowel handmatig als machinaal. Het is niet geweten op welke manier dit voor het beschouwde zand precies gebeurde, maar het principe is steeds hetzelfde. Door een graafmachine of een straalzuiger, geplaatst op een oever of een baggerinstallatie, wordt zand vanuit de rivierbodem of een put uitgegraven en verzameld. Nadien wordt het getransporteerd naar een verwerkingsinstallatie waar het verschillende keren wordt gewassen, en vervolgens wordt gezeefd en gedemineraliseerd²⁷⁶, zodat organische resten en mineralen die van nature in het rivierzand zitten worden verwijderd. Tenslotte wordt het zand finaal verdeeld naargelang de korrelgroottes. Doordat in de kalkpleister 2 types kwartzand met verschillende korrelverdelingen worden gebruikt, is het zandskelet in de uitgeharde kalkpleister redelijk compact. Dit beperkt de porositeit en maakt het mogelijk de pleister glad af te werken (zie Fig.18), waardoor de uitgeharde basislaag minder ontvankelijk wordt voor vuil en weersinvloeden²⁷⁷.

Hoewel zand als sediment hernieuwbaar is in termen van de geologische tijdperiodes, wordt het beschouwd als een niet-hernieuwbare grondstof omdat de regeneratie ervan gering is in menselijke kalenderjaren. Het winnen een veel grotere hoeveelheid ri4 zand dan wat door de natuur kan worden geregenereerd leidt – zoals bij alles – tot ernstige schade aan 'riversystemen'²⁷⁸. Deze schade wordt berokkend aan zowel de fysische, biologische, chemische en antropogene omgeving²⁷⁹, en houdt fenomenen in zoals erosie, vernietiging van fauna en flora, en vervuiling van drinkwater. Bovendien zorgt de aard van een ri4 ervoor dat deze effecten in cascade optreden en tot ver buiten de mijnsites reiken. Na de ontginning is de milieupact van rivierzandproductie dan wel weer gering. Bouwzand is een quasi inert materiaal waarvan de chemische structuur niet is gewijzigd ten opzichte van het natuurproduct. Daarom moet het geen energie-intensieve productieprocessen doorlopen en is het – indien niet vervuild – gemakkelijk terug te storten in de natuur.

- 272. KERAKOLL S.p.a. 2015
- 273. Een scraper is een voertuig dat wordt gebruikt voor grondverzet.
- 274. Rentier en Cammeraat 2022, p3
- 275. Methodes voor de ontginning in een actieve stroom zijn: 'bar scalping' of 'skimming', 'dry pit channel mining', 'wet pit channel mining', 'bar excavation', het gebruik van de 'instream sand trap' en 'channel wide instream mining'. De ontginning uit een rivierterras gebeurt ofwel op de 'natte' manier (niveau van de graafput onder het grondwaterpeil) of op de 'droge' manier (Padmalal en Maya 2014, p27-29).
- 276. Het procédé hierachter is niet gekend.
- 277. De Jonghe 2022
- 278. Padmalal en Maya 2014, pp 3, 31
- 279. Rentier en Cammeraat 2022, pp 3-5

Productie, hydraulische kalk (zie Fig.26)

Het bindmiddel in de basispleister is een 'zuivere, natuurlijke' hydraulische kalk NHL 3.5²⁸⁰. Deze kalk heeft hydraulische eigenschappen, wat wilt zeggen dat een dergelijke kalk voor een belangrijk deel kan uitharden door vermenging met water, zonder toevoeging van andere reactieve bestanddelen en zonder toetreding van lucht (CO₂). Na de verhardingsreactie desintegreert een hydraulisch bindmiddel bovendien niet meer in water, wat een leempleister of hydraatkalk wel – gedeeltelijk – doet²⁸¹. Verder berust de productie op **diesel** voor **graafmachines** en **gemechaniseerd transport** (vrachtwagens en bulldozers), **elektriciteit** voor de verbrijzeling van de steen en kalkoven, **gas** voor de verbranding en **water** voor het blussen.

De grondstof **kalksteen** is een sedimentair gesteente dat ontstaan is door verharding van carbonaatafzettingen (kalkafzettingen), die in een zee of een meer zijn gevormd door anorganische of organische processen²⁸². De geologische omstandigheden tijdens de vorming van een kalksteen zijn bepalend voor het verhardingsproces van het bindmiddel dat uit dit gesteente wordt vervaardigd, aangezien de natuurlijke variaties in het kleigehalte van kalksteen zeer belangrijke gevolgen hebben voor het uithardingsgedrag – lees: de hydrauliciteit – van het uiteindelijke kalkproduct²⁸³. Hydraulische kalk wordt geproduceerd uit 'onzuivere kalksteen', die niet volledig bestaat uit pure calciumcarbonaat (CaCO₃), maar tevens minstens 9 tot 12% kleiachtige elementen²⁸⁴ en organische componenten bevat. De precieze locatie van ontginning in Italië van de beschouwde kalk is niet gekend. Algemeen wordt kalksteen ontgonnen in open groeves die een grote oppervlakte kunnen innemen. 'Grote groeves', zo stelt Berge (2009), 'berokkenen onvermijdelijke schade aan het landschap, zelfs al worden ze uiteindelijk [...] terug begroeid. Ze kunnen ook leiden tot gewijzigde grondwatercondities en lokale ecosystemen beschadigen.'²⁸⁷ Om te beginnen wordt de oppervlakte door bulldozers gevrijwaard van bomen en ander organisch materiaal, losse stenen en aarde. Daarna worden schachten²⁸⁶ geboord in het gesteente en gevuld met dynamiet, die vervolgens wordt ontstoken. Zachte gesteenten zoals kalksteen kunnen ook worden opgedolven door gebruik van een draadzaag²⁸⁷. De brokstukken worden door bulldozers en kiepwagens verzameld en gestockeerd.

Aangezien de kalksteenbrokken nog te groot zijn om te worden gebrand, worden ze eerst verbrijzeld in of in de nabijheid van de groeve, een proces waarin de steen in meerdere, opeenvolgende fases tot steeds kleinere brokstukken (max. enkele cm in diameter) wordt gereduceerd²⁸⁸. De eigenlijke productie van de kalkbinder uit de kalksteen begint met een verbrandingsproces, de 'calcinatie'. Hierbij wordt de kleirijke kalksteen verhit tot een temperatuur boven 900°C²⁸⁹. Door deze verbranding wordt het hoofdbestanddeel CaCO₃ omgezet naar 'ongebluste kalk' of calciumoxide (CaO)²⁹⁰, en veranderen de kleiachtige elementen in hydraulisch reactieve componenten, waarvan de belangrijkste dicalciumsilicaat (C2S) is²⁹¹. CO₂ is een onvermijdelijk

280. Hydraulische kalk (Natural Hydraulic Lime) is verkrijgbaar in 3 verschillende klassen: NHL 2, NHL 3.5 en NHL 5. Het getal heeft betrekking op de druksterkte [MPa] na 28 dagen volgens de huidige British Standard, en is op die manier direct gerelateerd aan de graad van hydrauliciteit (Traditional Lime Company Ltd. z.d.).

281. Zie onderdelen 'A8. Basisleem-pleister' en 'A5. Kalkhenep'.

282. In het anorganisch proces slaat het carbonaat ten gevolge van oververzadiging in het water neer op de bodem. Bij organische processen is de kalk afkomstig uit de skeletjes van zeediertjes, zoals schelpen, koralen, kalkalgen en zeer kleine, in het water zwevende organismen (Balen en Bommel 2003, p82).

283. Balen en Bommel 2003, p85

284. Aluminiumoxide (Al₂O₃) en ijzer-oxide (Fe₂O₃).

285. Berge 2009, p109

286. De diepte en plaatsing van deze schachten wordt bepaald door de dikte en samenstelling van het gesteente. Buskruit geeft een meer gedempte explosie. Dynamiet veroorzaakt microscopische haarscheurtjes in de te ontginnen blokken, al heeft dit geen belang voor verbrijzelde gesteenten (Berge 2009, p113).

287. Berge 2009, p113

288. Voor de verbrijzeling van kalksteen kunnen verschillende machines kunnen worden aangewend. Een mogelijke volgorde bestaat uit de kaakbreker, slagbreker en kegelbreker die worden gelinkt door transportbanden. Deze machines werken meestal op diesel. (FABO 2003)

289. Vaak wordt een temperatuur tussen 1000°C en 1100°C aangehouden.

290. Zie onderdeel 'A5. Kalkhenep: productie hydraatkalk'.

291. De hydraulische componenten in hydraulische kalk zijn dicalciumsilicaat (C2S), tricalciumsilicaat (C3S) en tricalciumalluminaat (C3A). Deze formules zijn overigens geen chemische formules, maar verkorte aanduidingen uit de morteltechnologie (Balen en Bommel 2003, p18).

en uitvoerig geproduceerd bijproduct van de calcinatie en de vereiste hoge temperaturen impliceren tegelijk dat de productie van kalk een energie intensief proces is. De calcinatie kan gebeuren in verschillende oventypes. In een traditionele kalkoven worden afwisselend lagen kalksteen en brandstof²⁹² opgestapeld. Onderaan wordt een vuur gestookt waardoor de onderste laag kalksteen calcineert een door een rooster valt²⁹³. Tegenwoordig wordt de meeste kalksteen gebrand door een gasvlam in een roterende cementoven, gelijkaardig aan de productie van portlandcement.

Het blussen van de gecalcineerde kalk is een noodzakelijke stap in het gebruik van het eindproduct als bindmiddel, en geschiedt naargelang het aandeel vrije calciumoxide in de hydraulische kalk. In het blusproces reageert dit aandeel CaO met een hoeveelheid water die volstaat om alle CaO om te zetten in Ca(OH)₂ en de verliezen door verdamping te compenseren, die optreden doordat het blussen van kalk een sterk exotherme reactie is. Kalk kan 'nat' worden geblust, waarbij een overmaat aan water wordt toegevoegd en aldus een vette kalkdeeg ontstaat. Omdat het eindproduct echter hydraulisch van aard is, is duidelijk dat gebluste hydraulische kalk een droog poeder moet zijn dat pas gaat uitharden wanneer er water aan wordt toegevoegd op de werf. Bij het blusprocédé wordt er dus voor gezorgd dat alle CaO wordt omgezet in Ca(OH)₂²⁹⁴ maar dat de hydraulisch reactieve componenten niet beginnen te hydrateren²⁹⁵. Daarom werd de hydraulische kalk 'droog geblust'. Dit gebeurt in een afgesloten mengmachine. Daar wordt net voldoende water voor de chemische reactie op de calciumoxide gesprendeld – rekening houdend met de hoeveelheid die verdampt – zodat een droge kalkpoeder ontstaat.

De productie van hydraulische kalk lijkt sterk op de productie van portlandcement, wat niet kan worden beschouwd als geo- of biogebaseerd materiaal. Dit is echter niet verwonderlijk, aangezien de grondstoffen voor cement²⁹⁶ ook worden gebrand om de cementklinker te vormen, en portlandcement voor 65% is samengesteld uit CaO. Wat betreft de hoeveelheid energie die bij de winning van grondstoffen wordt verbruikt zijn de verschillen tussen de 2 producten dus niet significant²⁹⁷. Ook de belangrijke milieuverontreiniging door geluidsoverlast en het ontginnen van groeves zijn gelijkaardig bij beide producten. Het is echter later in de materiaalcyclus dat kalk haar duurzaam karakter tegenover cement bewijst. Tijdens de productie moeten beiden worden gebrand, maar bij kalk gebeurt dit bij significant lagere temperaturen (900 – 1000°C) dan bij normaal portlandcement (1400 – 1500°C)²⁹⁸. Dat leidt tot grote verschillen in de benodigde hoeveelheid brandstof voor de productie, en in de hoeveelheid CO₂ die vrijkomt bij het verbranden van de brandstof²⁹⁹. Een uitermate belangrijke eigenschap van gebrande kalk is ook dat de carbonatie van Ca(OH)₂ tijdens de uithardingsfase ervoor zorgt dat een deel van de eerder uitgestoten CO₂ opnieuw wordt gecapteerd door de pleister³⁰⁰. Een ander voordeel van hydraulische kalk tegenover cement is dat het een relatief zacht bindmiddel is. Dit geeft de mogelijkheid de gebruikte kalkpleister te verwijderen met minimale beschadiging van de onderliggende wandstructuur.

292. Volgens Berge (2009) is hout de beste brandstof, aangezien de vlammen langer zijn en op die manier een meer egale verbranding van de steen optreedt (Berge 2009, p86). De benodigde hoeveelheid hout is groot, 'om één ton gebrande kalk te produceren was de hoeveelheid hout nodig van een eik met een diameter van zesenvierentig centimeter en een lengte van 9 meter of 2 dennen van hetzelfde formaat' (Balen en Bommel 2003, p102).

293. Balen en Bommel 2003, p101

294. Wanneer een hydraulische pleister wordt gemengd met water, zullen de calciumsilicaten en overige oxiden die in hydraulische bindmiddelen voorkomen reageren tot 'gels' en later tot structuren die de pleister doen verstarren en uitharden. De Ca(OH)₂ zal mogelijk ook reageren met reactieve oxiden, maar het grootste deel ervan kan alleen verharden volgens de 'carbonatatiereactie' (zie onderdeel A5. Kalkhennep: productie, hydraatkalk) (Balen en Bommel 2003, p124). Carbonatie van calciumhydroxide is dus tevens een essentiële reactie voor de uiteindelijke sterkte van een hydraulische kalk.

295. Balen en Bommel 2003, p11

296. Naast kalksteen zijn er voor de cementproductie nog een aantal andere stoffen nodig, zoals klei en gipsgesteente.

297. Balen en Bommel 2003, p41

298. Ibid., pp 17,18

299. Bij de productie van portlandcement komt ongeveer 50% van de CO₂ emissies van de chemische reactie, en 50% van het verbranden van brandstof (Berge 2009, p86). Het probleem bij kalk is dat de reactie zelf significant meer CO₂ produceert dan gebeurt bij het vormen van cementklinker (Balen en Bommel 2003, p42). Dit weegt echter niet op tegen de kleinere hoeveelheid CO₂ die vrijkomt bij het verbranden van de brandstof.

300. De reactie wordt beschreven in onderdeel 'A5. Kalkhennep'. Carbonatie kan er in theorie voor zorgen dat een blootgestelde kalkpleister na een periode van 50 jaar tot 90% van de eerder door calcinatie uitgestoten CO₂ opneemt, wat ook tot een gewichtstoename van de pleister leidt van ong. 1 kg/m² (Berge 2009, pp 98-99).

Productie, puzzolaan (zie Fig.26)

Er is geen informatie beschikbaar over wat het puzzolaan juist is dat door Kerakoll wordt toegevoegd aan het kalkpleistermengsel. Algemeen gesproken zijn puzzolanen silica- en/of aluminarijke materialen die, in fijnverdeelde vorm en in aanwezigheid van water, chemisch reageren met calciumhydroxide tot verbindingen met bindende eigenschappen³⁰¹. De reactie van puzzolanen met de vrije kalk in de pleister levert een bijdrage aan het verhardingsproces en aan de sterkte van de kalk³⁰². De vraag kan echter worden gesteld waarom puzzolanen worden toegevoegd in een hydraulische pleister. Omdat in deze pleister de hydraulische reacties de voornaamste bijdrage leveren aan het verhardingsproces, worden puzzolanen normaal gezien toegevoegd aan bindmiddelen met geringe of afwezige hydraulische eigenschappen, zoals luchtkalk³⁰³. Puzzolanen zijn immers geen bindmiddel op zichzelf, ze vormen een hydraulisch bindmiddel door de reactie met calciumhydroxide³⁰⁴.

Zoals vermeld is het type puzzolaan niet bekend. In onderdeel 'B1. Floatcoat kalkpleister, buiten' wordt ingegaan op de ontginning van een natuurlijke puzzolaan in kalkhennep, tras.

Productie, kalksteengranulaten (zie Fig.26)

Naast het siliciumzand wordt een deel van het skelet van de basislaag gevormd door granulaten van Dolomietenkalksteen, in korrelgrootteverdeling (0-2,5mm)³⁰⁵. Dolomiet is een sedimentair carbonaatgesteente dat een groot aandeel bevat van het mineraal dolomiet ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Het heeft meestal een fijnere korrelstructuur dan kalksteen maar heeft voor de rest gelijkaardige eigenschappen³⁰⁶. In de beschouwde pleister is de chemische samenstelling van de Dolomietenkalksteen echter niet van belang aangezien de steen wordt vermalen tot inerte, fijne granulaten.

Hoewel het niet bekend is waar het gesteente precies werd ontgonnen³⁰⁷, is het aannemelijk te stellen dat de processen van ontginning en verbrijzeling gelijkaardig zijn aan die bij kalksteen (zie onderdeel 'A1. Basislaag kalkpleister: productie, hydraulische kalk'), wegens de gelijkaardige structuur die Dolomiet bezit. De fijnheid van het granulaat kan worden bekomen op 2 manieren. Ofwel wordt het gebroken gesteente, dat geschikt is voor calcinatie, verder verbrijzeld in de besproken machines tot een kleinere korrel, ofwel wordt hetzelfde product machinaal gezeefd waarbij de kleinste fractie wordt verzameld en verpakt als fijn granulaat.

De milieuimpact van dit kalksteengranulaat is bijna enkel toe te schrijven aan de ontginningsfase in de groeve, en is dus eerder gering. Als inert geo-materiaal berokkent Dolomiet zelf ook tijdens latere levenscyclusfasen geen schade aan de omgeving.

301. Er bestaan natuurlijke (gemalen steenpoeders of aardachtige materialen) en kunstmatige puzzolanen (gemalen restproducten van de industrie, zoals baksteen of kolenas) (Balen en Bommel 2003, pp 90-92).

302. Puzzolanen bevatten vrije silica (SiO_2), die dus niet gebonden is in de kristalroosters van kristallijne mineralen, en reageert met kalkhydraat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), voornamelijk onder de vorming van calciumsilicaathydraat (C-S-H) (Balen en Bommel 2003, p125).

303. Zie onderdeel 'A5. Kalkhennep'.

304. Balen en Bommel 2003, p125

305. KERAKOLL S.p.a. 2015

306. Dolomiet heeft een zeker potentieel als alternatief voor kalk in puzzolaan-cement. Gebrande Dolomietenkalksteen bevat veel magnesiumoxide (MgO), dat veel trager blust dan calciumoxide. Hierdoor kunnen magnesiumoxidebolletjes langer nablussen dan de calciumoxide in de gebluste kalk, met swelling van de kalk tot gevolg (Balen en Bommel 2003, p247). De technieken van calcinatie en blussen zijn grotendeels hetzelfde als voor kalk (Berge 2009, p89).

307. De groeve bevindt zich logischerwijs in de Dolomieten, een bergketen in Noord-Italië die deel uitmaakt van de Zuidelijke Kalkalpen.

A2. Wapeningsnet

Algemeen

Onder de buitenste pleisterlaag zit een wapeningsnet. Dit net werd door de pleisterwerker in de pas aangebrachte hechtalkpleister (A3) geduwd met een plakmes. Het net zorgt ervoor dat het oppervlak van A3 de buitenste laag A1 'goed kan ontvangen, dat dit oppervlak strak wordt gezet en dat spanningen [in de ondergrond (A4)] goed kunnen worden opgevangen'³⁰⁸. Door de buitenpleister te wapenen, worden (grote) scheuren vermeden en de bescherming van de wand gedurende lange tijd³⁰⁹ gegarandeerd.

Het wapeningsnet is gemaakt uit **glasvezel**. Meer informatie over het gebruikte product is echter niet geweten, daarom wordt uitgegaan van **Sto-Glasweefsel** van de fabrikant Sto. Dit wapeningsnet wordt op de werf geleverd in rollen van 5000cm lang en 110cm breed, en heeft een maasbreedte van 6x6 mm³¹⁰. Glasvezel is een uitermate licht materiaal met een hoge treksterkte, en is alkalibestendig, wat het toepasbaar maakt als wapening in een kalkpleister.

Productie (zie Fig.27)

De productie van het wapeningsnet bestaat uit 2 onderdelen: de productie van de glasvezel en het weven van de vezels tot een net. Er zijn verschillende soorten glasvezel, variërend in samenstelling en sterkte³¹¹. De standaard wapening bestaat uit E-glas, wat ontwikkeld is als een meer alkalibestendige variant van het klassieke natronkalkglas³¹². De productie berust op **fossiele brandstoffen** voor de ontginning van grondstoffen en **gemechaniseerd transport** (vrachtwagens en bulldozers), **elektriciteit** voor pneumatische transportbanden en weefmachines, **aardgas** voor het smeltproces, **water** voor het afkoelen en een **coating** of 'size' voor het coaten van de vezels.

E-glasvezels bestaat voornamelijk uit **silica** (SiO₂), wat het basisbestanddeel is in zuiver kwartszand³¹³. De verschillende droge grondstoffen worden om te beginnen nauwkeurig gedoseerd en innig gemengd in een geautomatiseerd proces met pneumatische banden en mengmachines. Vervolgens wordt de mengeling met een andere band naar een met aardgas gestookte oven geleid. Daar worden de grondstoffen in 3 fasen gesmolten, geüniformiseerd en worden luchtbellens uit het mengsel afgevoerd, aan een temperatuur van ongeveer 1400°C. Het laatste deel van de oven, waar het glasmengsel doorstroomt, is de 'voorhaard', waarin zich een reeks aan glijlagers bevindt. Het zijn de fijne en talrijke openingen in deze glijlagers waardoor de glassmelt wordt geëxtrudeerd tot viskeuze filamenten. Watersproeiers koelen deze vezels, die de lagere verlaten aan een temperatuur van ongeveer 1200°C, aan een snel tempo af. De afgekoelde glasvezels worden meteen aan hoge snelheid op een spoel getrokken, in een proces dat 'attenuatie' heet. Doordat dit sneller gebeurt dan de snelheid van extrusie worden de vezels tot zeer fijne diameters getrokken. Hierna wordt een chemische coating³¹⁴ op de

Sto-Glasweefsel*

L x H x B [mm]	nvtxnvtx ~1
ρ [kg/m ³]	0,165
Treksterkte** [N/50mm]	1000
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ [W/mK]	nvt
c [J/kgK]	nvt

* Alle waarden werden bekomen uit (Sto Isomed bv 2020).

** Resterende treksterkte na veroudering.

308. De Jonghe 2022

309. De pleisterwerker spreekt over een levensduur voor de kalkpleisters van 'tientallen jaren' tot '2 mensenlevens', rekening houdend met de ruime dakoversteek die de muur beschermt. Dit vereist echter wel onderhoud, ongeveer elke 20 jaar, waarbij beschadigde en vervuilde stukken pleister worden weggenomen en opnieuw bezet (De Jonghe 2022).

310. Sto Isomed bv 2022

311. C-glas heeft een betere corrosiebestendigheid dan E; R en S hebben betere mechanische eigenschappen dan E maar zijn duurder. Een ander alkalibestendig glas is AR, dit wordt ook gebruikt voor de versterking van cement (Ashby 2013, p574).

312. Gardiner 2020

313. De samenstelling van E-glass is complex. De bestanddelen zijn: 53 – 55% siliciumoxide (SiO₂) dat wordt verkregen uit kwartszand, 14 – 15,5% aluminiumsilicaat (Al₂O₃) dat een bestanddeel is van klei, 20 – 24% calcium (CaO)- en magnesiumoxide (MgO) die respectievelijk uit kalksteen en zeewater of magnesiumhoudende gesteenten worden verkregen, en 5 – 9% boortrioxide (B₂O₃) dat afkomstig is van het mineraal borax (Ashby 2013, p574).

314. De samenstelling van de coating en het procedé hierachter is niet gekend.

vezels gezet die de vezels soepeler maakt, schuurwerking verhindert en ze meer compatibel maakt voor latere toepassing in composieten. Tenslotte worden de getrokken filamenten een draad samengevoegd. Deze draad wordt op een trommel gewikkeld. De trommels, die nog nat zijn van het afkoelen in water en coaten, worden vervolgens in een oven gedroogd, waarna ze kunnen worden gepalletiseerd³¹⁵.

Het weven van het eigenlijke wapeningsnet is een relatief low-tech en energiezuinig proces. Het begint met het afdraaien van verschillende glasvezelspoelen³¹⁶ door een 'warpmachine'³¹⁷, waarbij de verschillende draden worden samengevoegd om een vel te vormen. Vervolgens worden de draden door een weefmachine tot een wapeningsnet geweven. Ten slotte wordt het net in gewenste breedtes gesneden en worden de randen getrimd.

De ontginning van de vermelde grondstoffen en het smelten op hoge temperaturen maken van de glasvezelproductie een proces met significantie milieuimpact. Bovendien is de chemische samenstelling van het wapeningsnet volledig gewijzigd ten opzichte van die van de grondstoffen, waardoor het absoluut geen natuurlijk product is³¹⁸. Recyclage is praktisch gezien niet mogelijk, aangezien het net ingekapseld zit in een uitgeharde kalkpleister. Dit zorgt er echter ook voor dat de levensduur van de kalkpleister gevoelig wordt verlengd en onderhoud minder frequent dient te gebeuren.

A3. Hechtkalkpleister

Algemeen

De eerste pleisterlaag die op de houtvezelplaten werd gezet was de hechtkalkpleister. Deze pleister is van het type **Biocalce® Cappotto**, tevens van de fabrikant Kerakoll. De laag heeft als functie een goede hechting te garanderen van de basislaag op de ondergrond³¹⁹. Om dit te kunnen doen zit in het pleistermengsel een **plantaardige hars van dennebomen**³²⁰ als droge toeslagstof, die vermoedelijk uithardt en een binding vormt door de reactie met water. De hechtkalkpleister wordt in slechts 3 à 4 mm dikte op de vezelplaat gespoten, en vervolgens gekamd³²¹, wat toelaat er meteen het wapeningsnet in te drukken. Door de beperkte dikte van de laag worden er kleinere granulaten³²² gebruikt, met korrelgrootteverdeling (0 – 0,1mm). Voor de rest is de droge hechtkalkpleister A3 in samenstelling volledig gelijk aan de basislaag kalkpleister A1 – op de toevoeging van hars na – en wordt ze ook in zakken van 25 kg geleverd, waaraan ongeveer 7 liter water moet worden toegevoegd. De eigenschappen van deze kalkpleister zijn bijgevolg ook bijna volledig gelijk aan die van A1.

Wegens de gelijkaardige samenstelling wordt in het volgende onderdeel enkel kort ingegaan op de productie van de natuurlijke dennenhars.

315. Gardiner 2020

316. Het aantal spoelen dat wordt afgedraaid is afhankelijk van de breedte van het te produceren net en de densiteit van verweefde vezels.

317. Letterlijke vertaling van het Engelse 'warping machine'.

318. In principe zijn wapeningsnetten uit andere materialen zoals jute ook bruikbaar. Dit werd echter niet gedaan in wand A wegens de ervaring van de pleisterwerker. Enerzijds is jute niet bestand tegen de alkaliteit van kalk, en wordt deze na verloop van tijd 'weggevreten'. Anderzijds is het met glasvezelwapening mogelijk om veel sneller te werken, wat een lagere werkkost betekent (De Jonghe 2022). Ook in dit detail is de spanning tussen 'sustainability' en 'durability' merkbaar.

Biocalce® Cappotto*

L x H x B [mm]	nvtxnvtx4
ρ [kg/m ³]	~ 1200
Treksterkte [N/mm ²]	nvt
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ [W/mK]	0,32
c [J/kgK]	~ 1500

* Alle waarden werden bekomen uit (KERAKOLL S.p.a. 2013).

319. Op steenachtige ondergronden wordt deze hechtlaag bijvoorbeeld niet toegepast. Laag A3 dient dus enkel als link tussen A1 en A4 (De Jonghe 2022).

320. KERAKOLL S.p.a. 2013

321. Dit 'kammen' van de pleister geschiedt door met een plakijzer – of 'vlinder' – de pleisterlaag af te strijken en er op

Productie, plantaardige hars (zie Fig.28)

Colofonium, of plantaardige hars van de den, is een natuurlijke lijm. De stof wordt gewonnen uit de hars van dennen na destillatie³²³ van plantaardige terpentijnolie, en bestaat voornamelijk uit abietinezuur³²⁴. Aangezien het exacte productieproces van de beschouwde hars niet gekend is, wordt kort ingegaan op een generiek destillatieproces dat berust op **naaldhoutresten** die ongeschikt zijn voor constructiehout door een te hoog harsgehalte als grondstof³²⁵, **elektriciteit** voor de productielijn en **fossiele brandstoffen** (olie of aardgas) voor de destillatieapparatuur.

Om te beginnen wordt het hout gereduceerd tot houtsnippers. Deze snippers worden geladen in karren die in de verwarmingskamer worden gereden. De destillatie van het hout in deze kamer vereist een tijdsduur van 24 tot 48 uur, aan een temperatuur van ongeveer 400°C. Na dit proces zijn de snippers gereduceerd tot een water-oliedistillaat, een 'oncondenseerbaar gas', en houtskool. Er is geen standaardpraktijk voor de bereiding van eindproducten uit het ruwe destillaat. Een mogelijkheid is de ruwe olie uit het destillaat te scheiden van het water door bezinking en deze nadien een tweede keer te destilleren, een proces waaruit de hars wordt verkregen³²⁶.

Plantaardige lijmen zijn stuk voor stuk gebaseerd op hernieuwbare bronnen. Deze stoffen veroorzaken meestal zeer weinig verontreiniging tijdens hun productie, al is een kanttekening bij colofonium wel dat het een allergie veroorzakende stof is³²⁷, en dat de productie ervan het verbranden van fossiele brandstoffen inhoudt. Het gebruik van resthout als grondstof pleit dan weer voor de plantaardige hars. Een propere ontmanteling van de houtvezelplaat bij afbraak lijkt door de hechtpleister echter onbegonnen werk, maar 'materialen die met plantaardige lijm aan elkaar zijn gelijmd, kunnen gewoonlijk energetisch worden gerecycleerd in normale verbrandingsovens of gestort worden zonder speciale beperkingen'³²⁸.

die manier kappen in te zetten. Op deze manier wordt de pleister ook verdeeld over het oppervlak. (De Jonghe 2022).

322. Net zoals bij de basislaag kalkpleister A1 bestaat de fractie granulaten uit siliciumzand en uit verbrijzelde kalksteen (KERAKOLL S.p.a. 2013).

323. Naast de destructieve destillatie bestaan er nog een andere methode om hars te verzamelen: het 'extractieproces'. Hierbij wordt een petroleum- of koolteersolvent gemengd met de houtsnippers waardoor de hars hier aan wordt onttrokken (Beglinger 1958, p5).

324. Berge 2009, p402

325. 'Waste log and limb lightwood, together with larger proportions of stumpwood from old cut-over areas, comprise most of the raw materials for product recovery. Selected pitchy slabs and trimmings from pine-mill operations provide further limited amounts of raw material to the plants.' (Beglinger 1958, p2) De productie van dit resthout als restproduct van constructiehoutwinning wordt aldus niet in deze analyse opgenomen, hiervoor wordt verwezen naar onderdeel 'A6. Houtskelet'.

326. Beglinger 1958, pp 2,3

327. Berge 2009, p379

328. Ibid.

A4. Houtvezelplaat

Algemeen

De houtvezelplaten in wand A zijn van het type **GUTEX Thermowall®**, aangekocht bij en geplaatst door Houthandel De Groote in Lokeren. Dit type houtvezel-isolatie is een plaat die wordt gevormd uit houtvezels in een droog proces, door toevoeging van een kleine hoeveelheid PUR hars³²⁹. De afzonderlijke platen worden op de productieband uit één doorlopende plaat versneden, geprofileerd en eventueel nabehandeld met een bescherm laag – wat bij dit type niet is gebeurd³³⁰.

De GUTEX houtvezelplaten zijn licht, eerder zacht en bezitten een geringe maar niet verwaarloosbare sterkte en stijfheid, en zijn daarom stootvast. Het materiaal heeft een lage thermische geleidbaarheid λ , een lage dampdiffusieweerstand μ , en een hoge warmtecapaciteit c , en is daarom geschikt als thermisch isolatiemateriaal. Ook kan

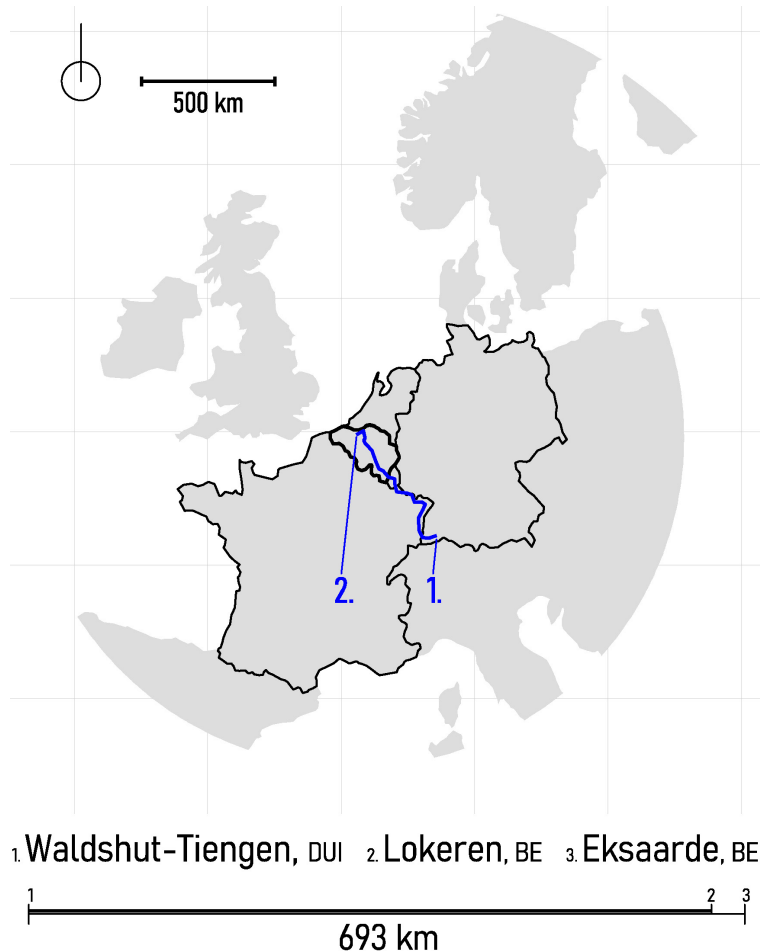
GUTEX Thermowall*	
L x H x B [mm]	1300x600x80
ρ [kg/m ³]	~ 160
Treksterkte [N/mm ²]	0,1
Druksterkte [N/mm ²]	5 – 30
λ [W/mK]	0,04
c [J/kgK]	2100

* Alle waarden werden bekomen uit (GUTEX 2020).

Deel 3: Geo- en biogebaseerde wanden in kaart gebracht

het dienen als akoestische isolatie. Mogelijke toepassingen kunnen variëren tussen massief- en skeletbouw, in binnen- en buitenmuren, tussenvloeren en daken.

Op onderstaande kaart is het transport voorgesteld vanaf de fabriekssite van GUTEX.



Productie (zie Fig.29)

Het productieproces van de GUTEX houtvezelplaat is gelijkaardig aan dat van MDF, maar is zuiniger wat betreft het gebruik van water. De productielijn bevindt zich in Waldshut-Thiengen, in het uiterste zuiden van Duitsland. De plaat bestaat voor ca. 94,5%³³¹ uit **naaldhoutvezels** (den en spar), die enerzijds afkomstig zijn van gevelde bomen uit de streek rond de fabriek, en anderzijds van gerecycleerd constructiehout of houtvezelplaten, mits deze onbehandeld zijn. De andere bestanddelen zijn max. 4% **PUR-hars** en max. 1,5% **paraffine**³³². Verder berust de productie op **gemechaniseerd transport** (vrachtwagens), **elektriciteit** voor de transportbanden in de fabriek, **water** en **fossiele brandstoffen** en water voor de productie van stoom.

Nadat ontschorste boomstammen of oud constructiehout werden gesorteerd naar massadichtheid, worden ze met de vrachtwagen naar een houtversnipperaar vervoerd, die ze verwerkt tot stukken

329. In overeenstemming met de Duitse norm DIN EN 13171.

330. PE INTERNATIONAL AG 2015, p2

Fig.22:
Transport: Houtvezelplaat

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

331. De hoeveelheid van een bestanddeel wordt steeds uitgedrukt als een massapercentage.

332. PE INTERNATIONAL AG 2015, p3

van enkele cm groot. Na opslag wordt het zand en vuil met gezuiverd water uit de snippers gewassen in een machinale trommel. Hierna wordt de massa op een transportband onderdoor een magneet gevoerd, om ijzeren en metalen resten te verwijderen. De propere houtsnippers worden nadien gereduceerd tot uniforme houtvezels in een 'ontvezelaar'³³³. Dit ontvezelen wordt voorafgegaan door het verhitten van de snippers met stoom om ze zacht te maken en van nature aanwezige hars uit het hout te drijven. Paraffine is een chemische bereiding uit aardoliefracties, en is niet oplosbaar in water. Daarom wordt deze stof in gesmolten vorm gemengd onder de houtvezels om ze te hydrofoberen. De gedroogde vezels worden in een stortkoker bespoten met PUR-hars, een polymeer, die als bindingsagent in het mengsel dient.

De plaat wordt gevormd door de vezels uit te spreiden tot een ruwe mat en ze voor te persen op een transportband. De GUTEX platen worden geproduceerd in een 'droog proces'³³⁴, wat wilt zeggen dat de ruwe mat wordt verwarmd door er een stoom-luchtmengsel met een nauwkeurig geregeld dauwpunt doorheen te blazen. Daarbij condenseert de stoom van het mengsel en warmen de vezels plots op tot de dauwpunttemperatuur, terwijl het gewenste evenwichtsvochtgehalte wordt gehandhaafd. Hierdoor hardt de PUR-hars uit en bekomt de plaat zijn sterkte, zonder toevoeging van extra water. Daarna wordt de plaat afgekoeld door omgevingslucht van boven naar beneden door de plaat te zuigen. Tenslotte zaagt een diagonale zaag stukken op de gewenste lengte, eventueel voorzien van tand en groef³³⁵.

A5. Kalkhennep

Algemeen

Het voornaamste isolerende materiaal in wand A is de kalkhennep opvulling tussen het houtskelet. In wand A werd het product **CaNaDry®** gebruikt, van het bedrijf EXIE, in Herzele³³⁶. CaNaDry® is een mengsel van **hennepscheven**, **hydraatkalk**, en een **additief**. De kalkhennep werd geleverd op de werf als korrelig bulkproduct dat bestaat uit scheven die afzonderlijk omhuld zijn met kalk en het additief. Deze bestanddelen werden door EXIE op voorhand elektrisch gemengd. Na toevoeging van **water** en grondig mengen op de werf werd een aardvochtig mengsel³³⁷ verkregen dat handmatig met emmers tussen de stijlen werd geschept en licht aangedamd. Door het aanwezige vocht hardde het mengsel langzaam³³⁸ uit en werd een harde en zelfdragende massa verkregen³³⁹, die door de aanwezigheid van kalk schimmelwerend is en vrij blijft van ongedierte. De hydraatkalk en de hennepscheven (zie verder) zorgen ervoor dat kalkhennep 0,3 kg CO₂ kan capteren per kg materiaal, mits het gebouw een 'voldoende lange tijd' blijft staan³⁴⁰.

Canadry® kalkhennep is een licht materiaal. Door de lage thermische geleidbaarheid λ en lage dampdiffusieweerstand μ is het geschikt

333. Letterlijke vertaling van het Engelse 'defibrator'. In tegenstelling tot wat de naam doet vermoeden, worden geen vezels verwijderd maar wordt de houtmassa hier tot gereduceerd. De ontvezelaar is een elektrisch aangedreven machine die bestaat uit een stationaire en een roterende schijf waarbij de houtsnippers in het midden van de schijven worden toegevoerd. De snippers worden tussen de schijven verbrijzeld naarmate de centrifugale kracht ze naar de rand van de schijven duwt (Valmet 2022).

334. In vergelijking met het meer traditionele 'nat' proces voor de productie van houtvezelplaten heeft dit als voordeel dat er geen vervuild afvalwater wordt geproduceerd, het drogingsproces wordt vereenvoudigd (en energiezuiniger wordt) en de platen lichter kunnen worden uitgevoerd (Siempelkamp 2022).

335. Siempelkamp 2022

EXIE Canadry*

L x H x B [mm]	nvtxnvtx235
ρ [kg/m ³]	~ 175
Treksterkte [N/mm ²]	nvt
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ [W/mK]	0,054
c** [J/kgK]	1000-2900

* Alle waarden werden bekomen uit (EXIE NV, z.d.).

** Waarde uit (Shang en Tariku 2021)

336. Productiefiliaal

337. De precieze hoeveelheden in dit mengsel zijn niet gekend, maar algemeen bestaat 'verse' kalkhennep uit 2/3 scheven, 1/6 kalk + binder en 1/6 water (volumedelen) (Ashby 2013, p341).

als thermische isolatie. Door de poreuze structuur is het ook een goede akoestische isolator. Naast dampopen is het materiaal ook hygroscopisch, door de porositeit van zowel de hennepscheven als de kalkbinder en de grote fractie ingesloten lucht in het uitgeharde geheel. Dit betekent dat kalkhennep een passieve vochtregulator is³⁴¹. Het hygroscopisch karakter heeft ook gevolgen voor de thermische isolatie, aangezien de warmtecapaciteit c sterk afhankelijk is van en stijgt met een toenemend vochtgehalte. Een hoge warmtecapaciteit is effectief om de koellast in een gebouw te verlagen in een warm klimaat³⁴².

Productie, hydraatkalk (zie Fig.30)

De binder in kalkhennep bestaat typisch uit hydraulische kalk (zie onderdeel 'A1. Basislaag kalkpleister') of hydraatkalk, wat het geval is in wand A. Over de producent is geen informatie beschikbaar. Hydraatkalk of calciumhydroxide (Ca(OH)_2) wordt geproduceerd door het blussen met water van calciumoxide (CaO), wat op zijn beurt het eindproduct is van de verbranding van zeer zuivere **kalksteen** (CaCO_3). Hydraatkalk staat ook bekend als 'luchtkalk', aangezien het niet reageert met water maar zeer langzaam uithardt door de reactie met CO_2 in de lucht tot calciumcarbonaat (CaCO_3), wat carbonatie wordt genoemd. In dit hele proces, gekend als de 'kalkcyclus', worden de hennepscheven aan elkaar gebonden. Het is tevens deze kalkcyclus die hydraatkalk zijn karakter van natuurlijk materiaal verleent, aangezien de cyclus in principe oneindig kan worden herhaald. Het uitgeharde calciumcarbonaat is waterdoorlatend en relatief elastisch³⁴³. Verder berust de productie – zoals bij hydraulische kalk – op **diesel** voor **graafmachines** en **gemechaniseerd transport** (vrachtwagens en bulldozers), **elektriciteit** voor de verbrijzeling en kalkoven, **gas** voor de verbranding en **water** voor het blussen.

Zeer pure, kleiarme kalkstenen hebben zich gevormd in de geologische periodes van de Jura en het Krijt, toen grote delen van West-Europa werden overspoeld door ondiepe binnenzeeën, en zijn in België te vinden in de provincies Henegouwen, Luik en Namen³⁴⁴. Zuivere kalksteen wordt op dezelfde manier ontgonnen en klaargemaakt voor de kalkoven als onzuivere kalksteen (zie onderdeel A1. Basislaag kalkpleister: hydraulische kalk).

De calcinatie van pure kalksteen is een eenvoudiger proces, dat evenwel ook optreedt bij het verbranden van de onzuivere steen.



Deze sterk endothermische reactie waarin kalksteen wordt 'gebrand' tot calciumoxide, treedt op zolang er een temperatuur heerst tussen 800°C en 1000°C , wat iets lager is dan bij de productie van hydraulische kalk³⁴⁵. In de bovenstaande reactie wordt de CO_2 productie en de grote energievraag van het calcinatieproces duidelijk weergegeven.

Ook het blussen van de gecalcineerde pure kalksteen is eenvoudiger. De ongebluste kalk (CaO) wordt gemengd met een hoeveelheid water die volstaat om alle CaO om te zetten in Ca(OH)_2 en de verliezen door

338. Volgens EXIE bedraagt de droog-tijd van CaNaDry® 1 uur. Dit is echter de slechts de minimale hoeveelheid tijd die vereist is om bekisting weg te nemen indien met dergelijk systeem wordt gewerkt. In het algemeen – maar dit is sterk afhankelijk van het type en de hoeveelheid additief – heeft kalkhennep tot een maand nodig om uit te harden en tot 3 maanden om volledig uit te drogen.

339. Deze massa behoudt zijn vorm maar kan niet worden belast. Ze heeft wel een voldoende hoge cohesie en hardheid voor het aanbrengen van een afwerkingslaag. Dit was in het geval van wand A echter niet van belang aangezien de kalkhennep werd aangebracht tussen de houtvezelplaten en de wilgenmatten, die fungeerden als verloren bekisting.

340. Ashby 2013, p341

341. Kalkhennep dempt variaties in de luchtvochtigheid binnen (op middellange termijn) door vocht te absorberen en af te staan. Dit heet vochtbuffering en wordt gewoonlijk gekwantificeerd door de 'moisture buffer value' (MBV) van een materiaal. Voor kalkhennep varieert deze van 1,99 tot $2,15 \text{ kg/m}^2\%\text{RV}$ (Shang en Tariku 2021, p2). Uiteraard mag het binnenoppervlak van de kalkhennep enkel door een zeer dampopen materiaal worden afgedekt om vochtbuffering mogelijk te maken.

342. EXIE NV, z.d.

343. EuLA, z.d.

344. Balen en Bommel 2003, pp 85,89

345. Berge 2009, p86.

verdamping te compenseren, die optreden doordat het blussen een sterk exotherme reactie is.



Ook deze hydraatkalk werd 'droog geblust', waarbij in een afgesloten mengmachine net voldoende water voor de chemische reactie op de calciumoxide werd gesprendeld – rekening houdend met de hoeveelheid die verdampt – zodat een droge kalkpoeder ontstaat.

Net zoals bij hydraulische kalk het geval is, lijkt de productie van hydraatkalk sterk op de productie van portlandcement, en wel voor dezelfde redenen³⁴⁶. De temperaturen waar pure kalksteen aan wordt gebrand liggen echter nog iets lager (800°C – 1000°C), wat het verbruik van fossiele brandstoffen en de CO₂ – uitstoot nog verder reduceert tegenover de cementproductie. Ook doet hydraatkalk eveneens aan CO₂ captatie³⁴⁷, beschreven in onderdeel A1. Hydraatkalk, hydraulische kalk en cement vormen een reeks met een afnemend gehalte aan CaO en een toenemend gehalte aan klei, wat overeenkomt met een ordening die reikt van een zuiver luchthardend, relatief traag reagerend bindmiddel naar een volledig hydraulisch en snel verhardend bindmiddel. Een toename in hydrauliciteit en snelheid van de uitharding hangt dus samen met een stijgend aandeel hydraulische componenten in de vorm van 'kleiachtige' bestanddelen tegenover een dalend aandeel kalkhydraat³⁴⁸. Het niet-hydraulisch karakter van hydraatkalk vormt een nadeel wat betreft de 'durability', aangezien deze kalk uitermate gevoelig is voor vocht. Wat betreft de 'sustainability' pleit dit echter in het voordeel van hydraatkalk. Niet enkel verbruiken de productieprocessen minder energie, een ander groot voordeel van hydraatkalk zit in de end-of-life fase van een gebouw(component). De uitgeharde hydraatkalk (CaCO₃) in de kalkhennep is in vergelijking met cement een zacht product en bovendien in wezen hetzelfde als de pure kalksteen waaruit het werd gemaakt³⁴⁹. Dit laat toe de kalkhennep te verbrokkelen en hergebruiken, indien ze nog in goede staat is. En indien hergebruik niet mogelijk of gewenst is, kan het als bio- en geomateriaal eenvoudigweg terug worden gestort in de natuur.

Productie, additief (zie Fig.30)

Er is geen informatie beschikbaar over wat het additief juist is dat EXIE toevoegt aan haar Canadry® kalkhennep, aangezien dit vertrouwelijke informatie is binnen het bedrijf. Het doel van het additief kan daarentegen wel worden afgeleid uit de andere samenstellende delen en de vereiste eigenschappen van de kalkhennepwand.

Een deel van het water in de net geplaatste en vochtige kalkhennep wordt als damp aan de buitenlucht afgegeven, een ander deel wordt door de hennepscheven opgezogen. Dit leidt tot een zeker compactie van de kalkdeeltjes, waardoor de capillaire krachten toenemen. Compactie en capillaire krachten zorgen voor een zeker cohesie van het materiaal. Daarna start de chemische binding³⁵⁰. Zoals eerder beschreven verhardt de gebruikte hydraat- of luchtkalk uit in een carbonatatieproces door te reageren met koolzuurgas (CO₂) uit de atmosfeer³⁵¹:

346. Een belangrijke opmerking die hierbij moet worden gemaakt is dat de beschouwde hydraatkalk een steenkalk is, en dus werd geproduceerd uit kalksteen. De milieupact van de schelpkalkproductie – wat ook hydraatkalk oplever – ligt daarentegen een pak lager. Om te beginnen is het aantal installaties veel minder omvangrijk dan bij steenkalk- en cementproductie. Ook herstelt het onderwaterlandschap zich vrij snel na het wegzuigen van de schelpen, onder invloed van getijdenstromen die de winputten terug opvullen. Bovendien zijn de schelpen die worden gewonnen slechts 300 tot 1500 jaar oud en vormen ze dus een grondstof die veel sneller wordt hernieuwd dan kalksteen (Balen en Bommel 2003, p44).

347. Zoals beschreven ligt de CO₂ captatie aan de basis van de carbonatatie en dus ook volledig aan de sterkte van hydraatkalk, wat dus nog een beter capterend middel is dan de hydraulische tegenhanger.

348. Balen en Bommel 2003, p20

349. De kalkcyclus waarvan eerder sprake was, is uniek voor hydraatkalk. De hydraulische reactieve componenten in hydraulische kalk zijn immers geen natuurlijke producten maar door de calcinatie chemisch gewijzigde kleideeltjes.

350. Balen en Bommel 2003, p123

351. In feite verloopt deze carbonatatie volgens 2 reacties. Tijdens de eerste reactie worden koolzuurgas en water omgezet in koolzuur (H₂CO₃), bij de tweede verbindt dat koolzuur zich met de gebluste calciumhydroxide (Balen en Bommel 2003, p123). De vereenvoudigde reactie zoals hierboven neergeschreven mag niet doen vergeten dat er voor de verharding ook water nodig is.



Deze reactie is exotherm. Het carbonatatieproces gaat echter traag omdat de diffusie van het koolzuurgas, die slechts in zeer geringe concentratie in de lucht aanwezig is, moeilijk verloopt in de poriënstructuur van de nog vochtige kalkhennep. Hoe breder de muur, hoe sterker dit geldt³⁵². Om dus toch een aanvaardbare droog- en verhardingstijd te bekomen, en nog steeds gebruik te kunnen maken van de natuurlijke luchtkalk, wordt een additief toegevoegd. Dit additief is in alle waarschijnlijkheid (gebaseerd op) een **puzzolaan**. De reactie van puzzolanen met de vrije kalk levert een bijdrage aan de snelheid van het verhardingsproces en aan de uiteindelijke sterkte van de kalkhennep. Door de reactie met de hydraatkalk vormen puzzolanen immers een hydraulisch bindmiddel, wat wilt zeggen dat de kalk naast de carbonatatie ook uithardt door de reactie met water. Het deel water dat wordt toegevoegd aan de kalkhennep dient dus niet enkel voor de verwerking en het carbonatatieproces, maar is ook essentieel voor een versnelde uitharding onder impuls van het additief.

Zoals vermeld is niet bekend of en welke puzzolaan aan de basis ligt van het EXIE additief. In onderdeel B1 wordt ingegaan op de ontginning van een natuurlijke puzzolaan in kalkhennep, tras.

Productie, hennepscheven (zie Fig.30)

Hennep is een snelgroeiend, hernieuwbaar en CO₂ absorberend bouw materiaal. De **hennepplant** is een zeer robuuste eenjarige plant die zonder bemesting³⁵³ of pesticiden kan worden gecultiveerd en maakt deel uit van de familie van bastplanten, bekend om hun lange, taaie vezels. Bastplanten hebben een buitenste stengelmantel die de 10-40% sterkste vezelmasse van de stengel bevat, in vezelbundels die een minder sterk vezelachtig materiaal omringen in de kern³⁵⁴. Het is dit kernmateriaal, de hennepscheven, dat wordt gebruikt in kalkhennep. Over de producent is geen informatie beschikbaar. Bij het verbouwen van de hennepplant wordt in alle fases gebruik gemaakt van landbouw- en transportvoertuigen die werken op **diesel**. Bij de verwerking in de fabriek of boerderij werken de meeste machines op **elektriciteit**.

Het zaaien vindt plaats van april tot eind mei na het ploegen van de landbouwgrond. Hennepplanten worden zeer dicht tegen elkaar geplant, zodat ze zeer hoog en recht groeien en de groei van onkruid wordt tegengehouden. Hennep heeft een opmerkelijke groeisnelheid en bereikt vaak hoogten van meer dan 4 m tegen augustus, wanneer de toppen en stengels afzonderlijk worden gemaaid met speciaal ontwikkelde landbouwmachines³⁵⁵. Opdat de vezels, die in bundels zitten ingekapseld, later gemakkelijker te scheiden zouden zijn van de scheven, worden de gemaaide hennepstengels vaak op het veld uitgespreid en blootgesteld aan de regen, zon en dauw gedurende 2 of 3 weken tijdens de late zomer. Dit 'veldroten' is een plaats- en tijdrovend maar energiezuinig proces, en wordt daarom opnieuw vaak – maar niet altijd – toegepast in de industriële hennepcultivering³⁵⁶. Na het roten wordt het droge hennepstro in balen geperst en opgeslagen tot aan de verwerking, waar de vezels van de houtige kern worden gescheiden.

352. Zo vermelden Balen en Bommel (2003) dat het in het inwendige van 'dikke muren' soms letterlijk eeuwen kan duren voordat de echte verharding van kalkmortel, de carbonatatie, plaatsvindt (Balen en Bommel 2003, p124).

353. Dit geldt enkel voor vruchtbare gronden. Ip en Miller (2012) vermelden het gebruik van 3 kunstmeststoffen: 'ammonium nitrate', 'triple superphosphate' en 'potassium chloride'. In deze studie was het gebruik van de meststoffen verantwoordelijk voor 8% van de broeikasgasemissies die voortkwamen uit de constructie van de kalkhennepwand (Ip en Miller 2012, pp 3,8).

354. Ashby 2013, p580

355. Ip en Miller 2012, p2

356. Berge 2009, p177

Hennepbalen worden met de vrachtwagen naar de fabriek vervoerd. De hennep wordt gehakseld nadat de balen zijn geopend en gevoed in de verwerkingslijn. De volgende fase is de ontschorsing, waarbij de vezels mechanisch worden verwijderd uit het stro worden gehaald en ze worden gescheiden in vezels, scheven en stof. Volgens Ip en Miller (2012) zijn deze processen volledig droog en niet-vervuilend, en werkt de productielijn op elektriciteit van het net³⁵⁷. De eindproducten zijn vezels, stof, afval en de scheven.

De hennepplant capteert CO₂ door fotosynthese en deze blijft opgeslagen in de hennepscheven³⁵⁸, totdat ze na afbraak van de kalkhennep wand worden verbrand of worden gestort en weggroten. De wand bestaat ong. voor 38%³⁵⁹ uit hennepscheven, en houdt zo een aanzienlijke opslagcapaciteit in.

A6. Houtskelet

Algemeen

De stevigheid van de wand wordt in de eerste plaats gegarandeerd door een houtskelet. Het skelet bestaat uit een **geïmpregneerde SLS** boven- en onderregel en verticale stijlen. SLS staat voor Scandinavian Lumber Standard en is doorgaans geschaafd vurenhout³⁶⁰. Voor de stijlen werden 38 x 235mm geschaafde spanten gebruikt, geplaatst met een h.o.h. afstand van 40cm. Het constructiehout werd aangekocht bij Houthandel De Groote in Lokeren, waar het op maat werd gezaagd alvorens het te leveren op de werf. Over de producent is geen informatie beschikbaar.

Hout is een licht en sterk constructiemateriaal, met een in verhouding tot het eigengewicht hoge trek- en druksterkte³⁶¹. Daarom is het houtskelet zeer geschikt als draagstructuur in de zelfdragende buitenwand A. Door een relatief lage λ -waarde worden geen koudebruggen gecreëerd door de volledige onderbrekingen van de kalkhennep, die zich goed kan hechten aan het oppervlak van de stijlen. Vurenhout is zacht, elastisch en middelmatig slijtvast. Het is gemakkelijk te bewerken, lijmen en verven, maar gevoelig voor vocht.

357. Ip en Miller 2012, p3

358. Ip en Miller (2012) refereren naar (Bevan and Woolley 2008), die stellen dat per kg verwerkte hennep 1,84 kg CO₂ wordt opgeslagen. Deze waarde komt niet overeen met Ashby (2013), die 0,3 kg/ kg kalkhennep voorstelt. Desondanks wordt de CO₂ opslag in kalkhennep algemeen onderschreven.

359. Uitgedrukt in volumedelen. De wand bestaat voor 56,8% uit kalkhennep. Na uitdroging nemen de scheven ongeveer 66% van dit volume in.

SLS geïmpregneerd*

L x H x B [mm]	nvtx38x235
ρ^{**} [kg/m ³]	450
Treksterkte [N/mm ²]	60
Druksterkte [N/mm ²]	45
λ^{***} [W/mK]	~ 0,25
c ^{***} [J/kgK]	~ 1700

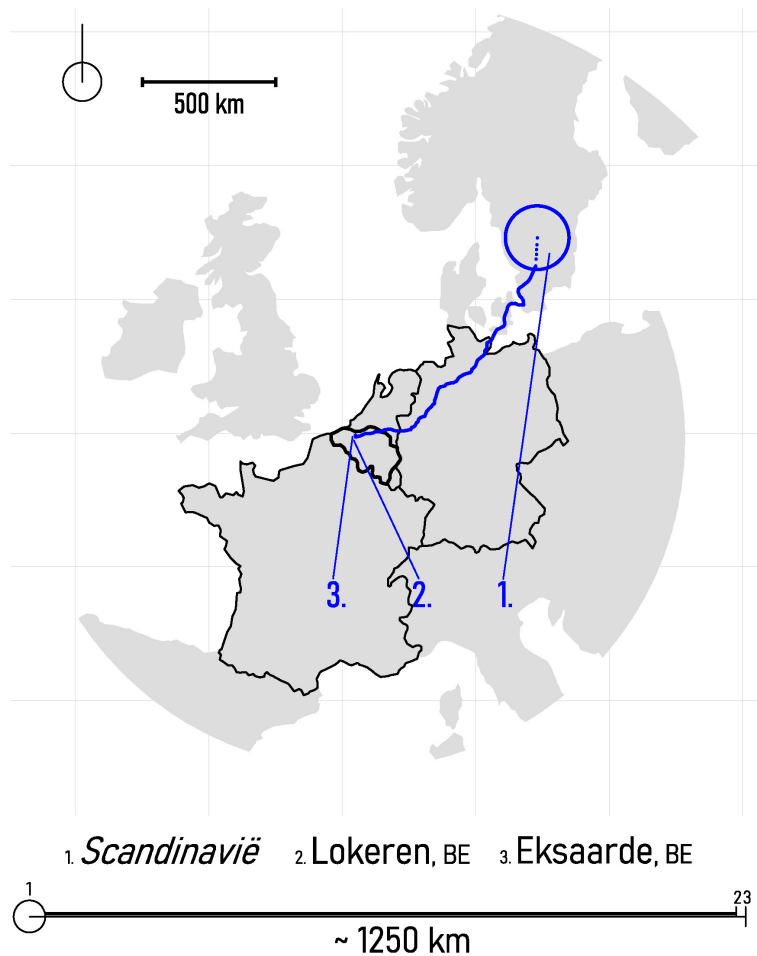
* Alle waarden werden bekomen uit (Belgian Woodforum 2022).

** Bij vochtgehalte van 15%.

*** Waarde uit (Ashby 2013)

360. Bij sommige handelaars wordt zowel vuren- als grenenhout onder SLS gerekend (Houtshop Van Der Gucht 2022). In ieder geval gaat het over hout dat afkomstig is uit Noord-Europa.

361. Als orthotroop materiaal verschillen de mechanische eigenschappen van constructiehout in radiale, tangentele en longitudinale richting, waarbij de laatste typisch de hoogste waarden kent.



Op bovenstaande kaart is het transport voorgesteld vanaf Scandinavië.

Fig.23:
Transport: SLS

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

Productie (zie Fig.31)

Vurenhout is het hout van de **fijnspar**. België commercialiseert zowel inlands als ingevoerd vurenhout uit Zweden, Finland, Rusland, Polen, Tsjechië en de Baltische staten³⁶². Voor wand A is de precieze afkomst van het hout niet gekend. Het bewerken van sparren tot constructiehout kan op meerdere manieren gebeuren, maar is in wezen geen complex proces³⁶³. De productie berust op **gemechaniseerd transport** (vellers, forwarders, tractors en vrachtwagens op **diesel**) en **elektriciteit** en **water** voor de productielijn in de fabriek. Net zoals het meeste constructiehout werd ook deze SLS nabehandeld met een **impregneermiddel**.

Moderne bosbouw voor constructiehout houdt meestal een monocultuur in van naaldbomen. Om economische redenen wordt de biodiversiteit in dergelijke bossen zo beperkt mogelijk gehouden³⁶⁴. Een dergelijke monocultuur, zo stelt Berge (2009), leidt onder meer tot een verzuring van de bodem en rivieren. Deze wouden zijn, ecologisch gezien, bijna als woestijnen; slechts weinige ecologische systemen kunnen er functioneren³⁶⁵. Dit neemt echter niet weg dat deze industriële bosbouw in essentie nog steeds berust op een natuurlijk proces, waarin koolstof uit de atmosfeer wordt opgeslagen in de biosfeer,

362. Belgian Woodforum 2022

363. Wegens een gebrek aan informatie over het exact gevolgde proces voor de beschouwde houten onderdelen, wordt in wat volgt een frequent toegepast proces beschreven.

364. De monocultuur van naaldbomen zorgt voor een zo kort mogelijke groeitijd. Verder maakt het gebrek aan lage vegetatie het gemakkelijker de bomen te vellen en opnieuw aan te planten.

365. Berge 2009, p168

waarop wordt ingegaan in het onderdeel 'Duurzaamheidsevaluatie'. Het is deze basisconditie in de productie van een bouw materiaal die hout terecht zijn imago van natuurlijk materiaal verleent³⁶⁶.

Een naaldboom laat wegens haar rechte stam en dunne zijtakken toe dat een velmachine met één kop, die gemonteerd staat op een kraanarm, opeenvolgend de boom aan de basis omzaagt, ontdoet van tophout, ontdoet van zijtakken en in lange stronken zaagt. Deze stronken worden vervolgens door de kraan met houtgrijper van een 'forwarder' in haar korf geladen en zo naar de kant van de weg gereden, waar ze na enige tijd in een vrachtwagen worden geladen voor transport naar de fabriek³⁶⁷. Daar worden de stammen om te beginnen in water gedrenkt, om ze reinigen van aarde en vuil, en de schors gedeeltelijk los te weken. Dit maakt het gemakkelijker om deze nadien machinaal van de stam te verwijderen in een ontschorser³⁶⁸. Hierna worden de 'geschoren' stronken verzaagd tot balken met de gewenste doorsnede. Afhankelijk van de nominale diameter van de stronken, gebeurt dit verzagen in één of 2 keer – bij de laatste optie wordt de stronk eerst verdeeld in doorsnedes met grote basismaten. In vele – iets oudere – productielijnen wordt de bladzaagmachine nog manueel bediend. Kleinere secties worden ook gezaagd door automatisch verstelbare cirkelzagen. Nadien wordt SLS geschaafd en gecontroleerd op defecten die de sterkte van het hout verminderen, welke worden afgezaagd. De afgewerkte balken worden verderop de productielijn automatisch gesorteerd op hun afmetingen, en worden ten slotte gestapeld en opgeslagen om uit te drogen tot een vochtgehalte van 15%.

Vers constructiehout kan op een artificiële manier worden gedroogd in een droogoven, maar ook op een natuurlijke manier, aan de buitenlucht. De openluchtmethode is betrouwbaarder voor het drogen van in de winter gevelde bomen in het voorjaar, aangezien kunstmatig drogen enige problemen kan inhouden³⁶⁹. Verder stelt Berge dat het energieverbruik voor de productie van 'normaal' hout stijgt met 300% wanneer het wordt gedroogd in een droogoven. Natuurlijk drogen kost daarentegen veel tijd³⁷⁰, en is daarom voor grotere secties al snel niet meer rendabel.

'Sinds de bosbouw werd geïndustrialiseerd is de algemene kwaliteit van bouwhout aanzienlijk verminderd en is de vraag naar biociden over de laatste eeuwen explosief gestegen³⁷¹. Ook het hout van de fijnspar is van nature niet duurzaam en gevoelig voor blauwschimmel, houtrot en aantasting door insecten. Door haar structuur is dit hout niet gemakkelijk te impregneren, maar toch wordt dit bij SLS steevast gedaan om de 'durability' ervan te verhogen³⁷². Vaak wordt gebruik gemaakt van een 'actieve' impregnatietechniek: de druk- of vacuümbehandeling. Hierbij wordt een stapel gedroogd constructiehout in een tank onder een vacuüm gebracht, waardoor de lucht gedeeltelijk uit de houtcellen verdwijnt. Wanneer de tank gevuld wordt met een impregneermiddel en het vacuüm daarna wordt weggenomen, dringt het middel tot diep in het hout onder

366. Bovendien haalt Berge terecht aan dat bosbouw voor constructiehout ook op ecologische principes kan worden gebaseerd. Dit vergt het aanplanten van een variëteit aan lokale boomsoorten, waaronder loofsoorten die de verzuring van de bodem tegengaan, en een zorgvuldige manier van volwassen bomen te vellen zodat jonge vegetatie niet te zeer wordt beschadigd. Thörnquist (1990) stelt dat constructiehout uit deze 'gemengde' bossen van een merkbaar beter kwaliteit is dan de monocultuur-varianten. (Berge 2009, p168) De snelheid van houtproductie en de benodigde arbeid, en bijgevolg de prijs van het eindproduct, zal in het traditioneel productiemodel echter aanzienlijk hoger liggen voor dit soort bosbouw.

367. Ecopedia z.d.

368. Een ontschorser bestaat in verschillende uitvoeringen, en werkt bijna steeds op elektriciteit. Zo kan de kop die de schors verwijdert bewegen langs het houtblok dat stationair wordt geroteerd, maar er bestaan ook types waarbij de stam doorheen een vaste opstelling van koppen wordt getrokken (Juwal 2018).

369. Bepaalde schimmelsoorten verdragen de temperaturen in een droogoven en ontwikkelen zich snel aan het houtoppervlak tijdens het drogen, waarbij sporen vrijkomen die allergieën kunnen veroorzaken. Verder kunnen suikers in het hout, die gewoonlijk verdampen tijdens het langzame droogproces, nog steeds aanwezig zijn in kunstmatig gedroogd hout, en zo een voedingsbodem vormen voor schimmels. Het is ook mogelijk dat natuurlijke harsen zoals formaldehyde in het hout niet goed uitharden, wat later aanzienlijke emissies in een gebouw kan veroorzaken (Berge 2009, p171).

370. Het aantal maanden dat nodig is voor het drogen kan ruwweg worden geschat door de dikte van het hout in centimeters te vermenigvuldigen met 3,2 voor sparrenhout en met 4,5 voor grenen. Voor loofhout duurt het nog langer (Berge 2009, p171).

371. Berge 2009, p415

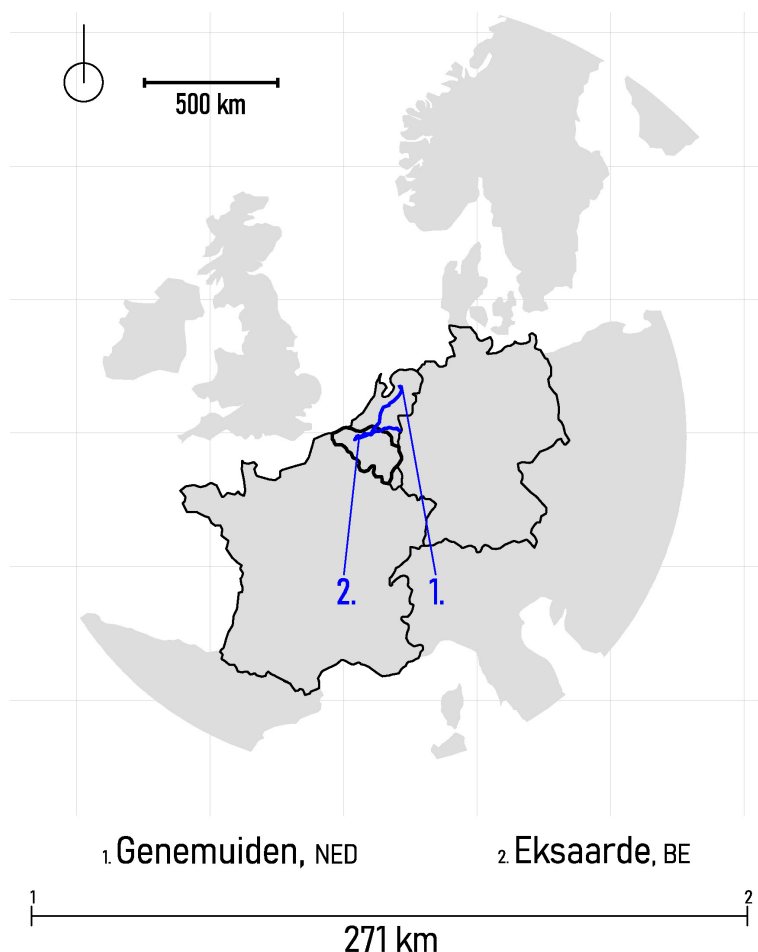
372. Belgian Woodforum 2022b

invloed van de atmosferische druk. Er bestaan verschillende actieve impregneermiddelen, op basis van mineralen, aardolie en steenkool, of hout. Over het middel dat in de beschouwde SLS werd gebruikt is geen informatie beschikbaar. Algemeen kan echter worden gesteld dat de effectiviteit van een impregneermiddel recht evenredig is met haar toxiciteit³⁷³. Zowel de productie van deze middelen als de verwerking van geïmpregneerd houtafval bij afbraak³⁷⁴ hebben dus een impact op het milieu, inclusief de mens. Ook dit gegeven telt bij het gebruik en het verduurzamen van een intrinsiek natuurlijk, hernieuwbaar en snelgroeiend bouw materiaal.

A7. Wilgenmat

Algemeen

De wilgenmatten die langs de binnenkant op het houtskelet werden geniet, dienen als verloren bekisting voor de kalkhennep en als ondergrond voor de binnenpleister. Het betreft een **Wilgenmat Concour**, van de Nederlandse producent Riethandel Jos van Rees & Z.N. BV. De mat is gemaakt van ca. 10 mm dikke wilgentenen, per stengel om de 80 mm samengebonden met een gegalvaniseerde staaldraad (dikte onbekend). De gebruikte matten bestonden uit twijgen van 1000 mm lang en waren zelf 3000 mm lang, en werden op maat afgezaagd eens ze op het houtskelet waren bevestigd.



373. Berge 2009, pp 415,416

374. Geïmpregneerd hout is geen zuiver natuurproduct meer. Indien zulk constructiehout na afbraak niet meer als dusdanig kan worden hergebruikt, is de beste optie aldus om het te recyclen naar een type vezelplaat, isolatie,...

Wilgenmat

L x H x B [mm]	3000x1000x~10
ρ^* [kg/m ³]	~ 5
Treksterkte [N/mm ²]	nvt
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ [W/mK]	nvt
c [J/kgK]	nvt

* Inschatting gebaseerd op (TRADA z.d.)

Fig.24:

Transport: Wilgenmat

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

Op bovenstaande kaart is het transport voorgesteld vanaf de fabriekssite van Riethandel Jos van Rees.

Informatie over de exacte materialen voor de wilgenmat is niet beschikbaar, in wat volgt worden dus generieke productieprocessen besproken. Het is tevens niet bekend op welke manier de wilgentenen werden samengebonden met de staaldraad, al gebeurt dit allicht in een geautomatiseerd proces. Verder dient te worden opgemerkt dat de productie van gegalvaniseerde staaldraad een energie-intensief proces met een bijhorende significante milieupact is, maar de hoeveelheid draad in wand A zeer beperkt blijft.

Productie, wilgentenen (zie Fig.32)

De 'Wilg' is in feite een verzamelnaam voor honderden soorten loofbomen en struiken, waarvan de meeste van nature voorkomen in gematigde en koude klimaten. Voor de industriële oogst van wilgentenen wordt niet de wilgenboom, maar de wilgenstruik³⁷⁵ geteeld³⁷⁶. De wilgenstruik wordt vaak gecultiveerd als bron van hernieuwbare bio-energie, maar indien de twijgen niet worden verhakeld tot houtsnippers kunnen ze ook perfect dienen als bouw materiaal. Het betreft een meerjarige plant, die om 1 tot 4 jaar kan worden geoogst voor meer dan 20 jaar³⁷⁷. Een belangrijke eigenschap van de plant is haar enorm vermogen om CO₂ te capteren tijdens de snelle groei³⁷⁸. De productie van wilgentenen berust op **mechanische transport** (vrachtwagen, tractor) en **landbouwvoertuigen**, die werken op diesel.

Wilgentenen worden met een landbouwmachine aangeplant in ordelijke rijen, wat de teelt en oogst vergemakkelijkt. Op de meeste bodemtypes hoeft dit niet, maar 2 jaar na aanplantingen kunnen de planten beperkt worden bemest. Het belangrijkste tijdens de eerste groeifase is echter om de tenen machinaal vrij te houden van onkruid, totdat de wilgenstruiken zo hoog groeien dat onkruid niet meer kan groeien³⁷⁹. Wanneer de wilgenstruik wordt geoogst zijn de tenen nog niet volledig verhout zodat ze nog een zekere soepelheid bezitten. De oogst gebeurt in de winter, wanneer de tenen vrij zijn van bladeren en het groeiproces stil staat. De plant kan machinaal worden geoogst, waarbij een 'maaibalk' wordt gemonteerd op een tractor die de twijgen net boven de grond van de knot maait. Op deze manier blijven de knot en de wortels van de plant zitten om tijdens het voorjaar opnieuw uit te schieten. Na de oogst worden de twijgen verzameld, getrimd en ongeveer een jaar aan de lucht gedroogd, waardoor ze een grotere taaierheid verkrijgen³⁸⁰.

Productie, gegalvaniseerde staaldraad (zie Fig.32)

De productie van de staaldraad bestaat uit 2 fasen. In de eerste fase wordt stalen walsdraad geproduceerd uit schroot en ijzererts en cokes. Het exacte proces voor de draad in de bestudeerde mat is niet gekend, daarom wordt kort een generiek proces besproken³⁸¹. De eerste productiefase berust voornamelijk op het gebruik van **fossiele brandstoffen** voor de ontginning en het transport van

375. De 'wilgenstruik' is tevens een verzamelnaam voor een scala aan verschillende soorten, maar hierover is geen informatie beschikbaar.

376. CornellCALS z.d.

377. Afhankelijk van de soort. (Montes e.a. 2021)

378. De Wilg is één van de planten met de grootste capaciteit voor CO₂ opslag. Berge duidt op een jaarlijkse opslag van 15 ton CO₂ / hectare/ jaar. Deze waarde is evenwel sterk afhankelijk van de wilgensoort, ouderdom, bodemkwaliteit en klimatologische omstandigheden en kan tot 50% afwijken (Berge 2009, p162).

379. NORDIC BIOMASS z.d.

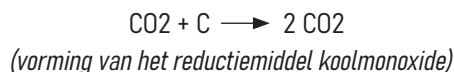
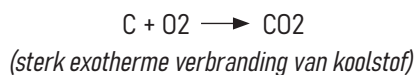
380. Mandenmakerij De Mythe z.d.

381. Gebaseerd op (Cullen e.a. 2010), geciteerd door (Ashby 2013, p418). In de productie van staal-halffabricaten worden verschillende technieken toegepast. Cullen e.a. kwantificeerden de mondiale flow van ijzer- en staalproducten doorheen desbetreffende productietechnieken.

ijzererts en steenkool, van poederkool, kalksteen en elektriciteit voor de verschillende ovens, en van elektriciteit en water voor de bediening van de productielijn. In de tweede fase wordt de walsdraad koud getrokken en gegalvaniseerd tot het eindproduct. In deze fase wordt eveneens beroep gedaan op gemechaniseerd transport (diesel), elektriciteit, gas en water voor de productielijn, en zink en aluminium voor het galvaniseren.

Het ontginnen van ijzer- en steenkoolerts is gelijkaardig aan de ontginning van kalksteen (zie onderdeel 'A5. Kalkhennep, productie hydraatkalk). De winning van ijzererts vindt eveneens meestal plaats in open groeven die zich uitstrekken over grote gebieden, en daarbij bestaande ecosystemen vernielen en vaak het grondwaterpeil verlagen. De winning van steenkool in open groeven of dieptemijnen veroorzaakt soortgelijke schade³⁸².

In essentie houdt staalproductie het maken van een koolstof-ijzerlegering³⁸³ in. Wereldwijd wordt 62%³⁸⁴ van het staal geproduceerd uit ijzererts en de rest uit gerecycleerd schroot. IJzererts en cokes³⁸⁵ worden in een hoogoven gesmolten en gemengd aan 1700°C-1800°C³⁸⁶ door de verbranding van poederkool die onderaan de oven wordt ingeblazen door hete lucht, zodat 'ruwijzer' wordt gevormd. Kalksteen wordt toegevoegd om onzuiverheden uit de smelt te onttrekken, en wordt daardoor omgevormd tot een puzzolaan dat in de cementindustrie wordt gebruikt. De belangrijkste reacties die optreden in de hoogoven zijn:



Een grote moderne hoogoven kan tot 1000 ton ruwijzer produceren op 24 uur. De benodigde hoeveelheid koelwater daarvoor is 'gelijk aan de hoeveelheid die een kleine stad zou verbruiken', en voor de productie van 1 ton ruwijzer wordt in een traditioneel proces 440-600 ton steenkool verbruikt³⁸⁷. De bovenstaande basisreacties laten zien dat er grote hoeveelheden CO₂ worden uitgestoten³⁸⁸, wat ook geldt voor zwaveldioxide, fluorverbindingen, stof en verscheidende zware metalen.

Het koolstofgehalte van het ruwijzer dient te worden verlaagd om tot staal te komen. Dit oxideren wordt gedaan door het inblazen van zuivere zuurstof (oxystaalprocedé) of door het ruwijzer te verhitten in een elektrische vlamboogoven³⁸⁹, die eveneens dient als eerste stap in de recyclage van schroot tot staal. Gesmolten schroot en ruwijzer waarvan het koolstofgehalte voldoende gereduceerd is zijn in essentie hetzelfde tussenproduct: vloeibaar staal. Dit wordt in een continu proces uitgetogen tot een 'knuppel', een staaf met ronde

382. Berge 2009, p77

383. Het koolstofgehalte is staal wordt begrensd tot ong. 2%. Ook andere elementen, zoals fosfor, zwavel en silicium zitten in de legering.

384. Cijfers uit 2008 (Ashby 2013, p417).

385. Cokes ontstaan door de thermolyse van steenkool, waardoor deze wordt omgezet in een zuiverdere brandstof.

386. Berge 2009, p77

387. Ibid.

388. Deze emissies komen deels van de verbranding van steenkool in het reductieproces, en deels van de verbranding van kalksteen die wordt toegevoegd.

389. De vlamboogoven verbruikt minder energie, en voornamelijk in de vorm van elektriciteit, en vertegenwoordigt tegenwoordig 30-40% van de wereldproductie. Staalproductie in vlamboogovens kan ook gebaseerd zijn op 100% staalschroot, terwijl andere productiemethoden slechts een fractie schroot toelaten (Berge 2009, p77).

390. Ashby 2013, p418

doorsnede. Ten slotte wordt de knuppel warm of koud getrokken tot een walsdraad, met een diameter tussen 10 en 20mm³⁹⁰.

In de tweede fase wordt uit de walsdraad de eigenlijke staaldraad gemaakt. Dit bijna geheel koud proces wordt op een andere locatie en meestal ook door een andere producent gedaan. De walsdraad wordt door een vrachtwagen geleverd op spoelen, die door een heftruck op het begin van de productielijn worden gezet. Nadat de spoel is afgerold wordt walsdraad 'mechanisch ontkalkt'. Dit is een proces waarbij de draad langs een wiel wordt gebogen zodat door de geïnduceerde spanningen CaCO₃ afzettingen aan het oppervlak van de draad worden verwijderd, en een glad oppervlak mogelijk wordt. Vervolgens wordt de walsdraad koud getrokken tot een staaldraad, waarbij de diameter van het eindproduct afhangt van de opening waardoor de draad wordt getrokken. De staaldraad kan enkel worden gegalvaniseerd na reiniging in een stoombad en door verhitting in een gasoven. Het galvaniseren zelf gebeurt door de draad doorheen een stroom te trekken van een gesmolten zink-aluminium legering, op minstens 450°C. Op deze manier wordt de staaldraad actief beschermd tegen corrosie. Dit galvaniseren wordt beschouwd als een ernstig vervuilend proces. Er is immers een uitstoot van onder meer organische oplosmiddelen, cyaniden, chroom, fosfaten en fluoriden, hoofdzakelijke in het reinigingswater, wat dan als gevaarlijk afval dient te worden behandeld³⁹¹.

De productie van gegalvaniseerde staaldraad brengt dus een grote milieuimpact met zich mee. Een deel is te wijten aan de materiële verontreiniging door de chemie achter het smeltproces. Anderzijds komt dit ook door het verbranden van fossiele brandstoffen, mede doordat het energieverbruik voor de winning en raffinage van metalen uit erts zeer hoog is³⁹². Dit neemt echter niet weg dat de gebruikte hoeveelheid gegalvaniseerd staal en de bijhorende impact in wand A bijzonder klein is. Maar metalen hebben ook intrinsieke ecologische voordelen. Ten eerste veroorzaken ze relatief weinig milieuproblemen eens ze op een correcte manier in een gebouw zijn toegepast³⁹³. Het is echter vooral de mogelijkheid om metalen te recyclen die voor hen pleit. De technologie voor het recyclen van staalschroot is betrekkelijk eenvoudig. Het elektrolytisch afbreken van legeringen en verdere raffinage-, giet- of walstechnieken vereisen echter veel complexere machines³⁹⁴.

A8. Basis leempleister

Algemeen

De binnenkant van wand A werd om te beginnen afgewerkt met een basis leempleister, die op de wilgenmatten werd gespoten en als onderlaag voor de afwerkingslaag A9 dient. Het betreft het type **Basisleem met stro** van de Duitse fabrikant Claytec. Door het onregelmatig oppervlak van de wilgenmatten werd geopteerd om de basispleister zelf ook in 2 lagen aan te brengen³⁹⁵, waarbij de eerste

391. Berge 2009, p78

392. De ingebedde energie van staal, enkel gewonnen uit ijzererts, bedraagt 21-25 MJ/kg (Berge 2009, pp 73,74).

393. Hiermee wordt geduid op het passief of actief beschermen van kwetsbare metalen tegenover vocht.

394. Berge 2009, p76

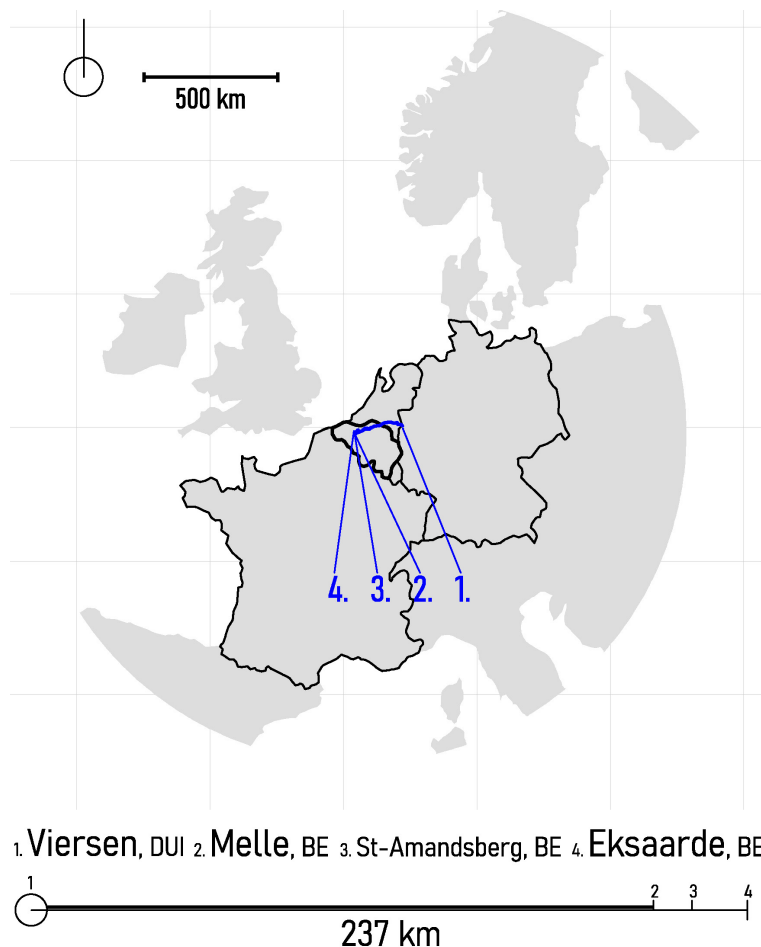
Basisleem met stro

L x H x B [mm]	nvtxnvtx20
ρ [kg/m ³]	~ 1600
Buigtreksterkte [N/mm ²]	0,7
Druksterkte [N/mm ²]	1,5
Hechtsterkte [N/mm ²]	0,1
λ [W/mK]	0,91
c [J/kgK]	nvt

* Alle waarden werden bekomen uit (CLAYTEC 2021).

laag de holtes tussen de wilgentakken opvulde, en de uiteindelijke dikte van de basislaag ongeveer 20mm bedroeg. In de natte basislaag werd – op een gelijkaardige manier en voor dezelfde redenen als bij de buitenpleisters – een wapeningsnet A2 geduwd.

De basis leempleister bestaat uit een deel leemkorrels (tot 5mm)³⁹⁶, een deel zand met korrelverdeling (0-2mm) en een deel gehakseld gerststro (vezels tot 30mm). De verhouding van de samenstellende delen is echter niet gekend. De pleistermengeling werd 'aardvochtig' op de werf geleverd in big-bags van 1 ton³⁹⁷, samengesteld door Claytec en geleverd door Ecostore. De uitgeharde pleisterlaag is poreus en dampopen, en heeft een vrij ruw oppervlak. Ze bezit een relatief hoge druk- en hechtsterkte.



Op bovenstaande kaart is het transport voorgesteld vanaf de fabriekssite van Claytec.

Hoewel er dus sprake is van een 'leempleister', is het product in werkelijkheid een mengeling van nauwkeurig gedoseerde geo- en biogebaseerde bestanddelen. Een natuurlijke grondsoort kan zonder veel aanpassingen geschikt zijn voor specifieke toepassingen³⁹⁸, maar in het algemeen heeft grond echter bepaalde 'tekortkomingen' in haar korrelverdeling³⁹⁹ die grotendeels kunnen worden gecompenseerd door toevoeging van aggregaten en/of additieven in zorgvuldig geplande doseringen⁴⁰⁰. Het is echter belangrijk om te beseffen dat

395. Het uitvoeren van de basispleister in 2 lagen is de enigste manier om een 'mooie, strakke' laag te verkrijgen op een onregelmatig oppervlak. Dit geldt ook voor de binnenmuren die uit het oorspronkelijk metselwerk bestaan (De Jonghe 2022).

Fig.25:
Transport: Basis leempleister

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

396. In het productblad wordt aanduiding gemaakt van 'natuurlijke bouwleem tot 5mm' ('natural building clay up to 5 mm') (CLAYTEC 2021). Aangezien de korreldiameter van afzonderlijke zandkorrels < 2 mm (zie voetnoot 39), en dit de grootste grondpartikels zijn, gaat het hier waarschijnlijk over een fijn gemalen en gegranuleerde kleigrond, waarin tevens een silt- en zandfractie zit. Hier wordt verderop op ingegaan.

397. De aardvochtige pleister moet worden gemengd met 10-15% van het volume in water, wat 0,6 m³ natte pleister oplevert (CLAYTEC 2021).

398. Zo is lössgrond, een silt-achtige grondsoort met een hoog kalkgehalte die door de wind is meegevoerd, vaak geschikt om als dusdanig te gebruiken in aardepleisters (Schroeder 2016, pp 51,60).

399. De geschiktheid van een grondsoort om mee te bouwen is niet afhankelijk van haar herkomst of chemische samenstelling, maar wel voornamelijk van haar cohesiegraad en korrelverdeling (Volhard 2015, p43).

400. Berge 2009, p61

deze tekortkomingen voor veel grondsoorten niet meer zijn dan een afwijking van een geoptimaliseerde samenstelling, die werd bepaald vanuit de optiek de verwerkbaarheid bij constructie, maar vooral de levensduur van het uiteindelijke gebouwcomponent te optimaliseren. Wand A werd gebouwd in Eksaarde, op een site met een kleiachtige leembodem, wat waarschijnlijk een geschikte grond zou geweest zijn voor in de pleister. Maar 'vandaag de dag worden aarde bouwmaterialen grotendeels industrieel geproduceerd. Dit maakt het noodzakelijk steeds grotere hoeveelheden bouwarme van constante kwaliteitsniveaus te ontginnen. Dat kan alleen worden gewaarborgd door voortdurende controle van de belangrijkste eigenschappen van de grond'⁴⁰¹. Moderne aardebouw kan alleen economisch zijn als de fabricage wordt gecentraliseerd en de productievolumes voldoende groot zijn om adequate voorraden te aan te kunnen leggen. Dit zorgt ervoor dat voor een materiaal dat an sich bijna overal te vinden is, een zeer groot deel van de milieuimpact toe te schrijven is aan transport⁴⁰².

Productie, kleideeltjes (zie Fig.33)

Het uitharden van de leempleister berust niet op een hydraulische werking of carbonatatiereactie, zoals het geval is bij kalkpleisters. De bindingssterkte in de uitgeharde pleister wordt grotendeels verzekerd door de cohesiekrachten tussen de lamelvormige kleipartikels⁴⁰³. De fractie kleideeltjes in een leemgrond en -pleister is dus van primordiaal belang voor haar uiteindelijke sterkte. Kleirijke bodems maken deel uit van de bovenste laag van de vaste aardkorst die werd gevormd onder invloed van erosie en flora en fauna. Daardoor is deze grond bijna overal terug te vinden⁴⁰⁴. De exacte locatie van ontginning is niet gekend, maar ligt in alle waarschijnlijkheid in de buurt van het Duitse filiaal van Claytec, in Viersen, Duitsland. De productie van de kleideeltjes berust op **mechanische extractie** van grond door bulldozers, wielladers en scrapers (**diesel**), **mechanisch transport** tussen de groeve en verwerkingsinstallaties met vrachtwagens en opleggers (**diesel**) en **elektriciteit** en **water** voor de verwerking op de productielijn tot een bouw materiaal⁴⁰⁵.

Kleigrond kan worden verkregen als een gerecycleerd product uit afgebroken gebouwonderdelen of als afvalproduct van het grindwasproces voor granulatenproductie, maar het grootste aandeel wordt in groeves gewonnen uit natuurlijke afzettingen. Alvorens de kleigrond kan worden ontgonnen, moet de toplaag worden afgegraven. Alle organische materie, boomwortels, grindlenzen etc. worden elders gestockeerd om te vermijden dat ze zich mengen met de bouwgrond. De kleiaarde wordt mechanisch afgegraven en verzameld met behulp van de vermelde machines⁴⁰⁶. Bij de ontginning wordt er op gelet dat de grond in dunne plakken (< 20cm) wordt afgegraven, zodat de verwerking ervan eenvoudiger wordt. Dit betekent dat de zorgvuldigheid waarmee wordt ontgonnen van directe invloed is op de verwerking en kwaliteit van het uiteindelijke bouw materiaal, waarmee (klei)aarde zich onderscheidt van andere geo-materialen⁴⁰⁷.

401. Schroeder 2016, p63

402. Voor de hele woning A – inclusief plafonds en binnenmuren – werden 20 big-bags basispleister gebruikt, of meer dan 30 ton. Deze hoeveelheid werd aangevoerd met verschillende vrachtwagens (De Jonghe 2022).

403. Wanneer klei in contact komt met water vormen zich dunne filmen op de lamellen waardoor deze gemakkelijk langs elkaar glijden. Wanneer dit water verdampt, veroorzaakt moleculaire aantrekking tussen de oppervlaktes van de lamellen dat ze zich aan elkaar hechten. Dit mechanisme geeft aan klei haar cohesieve eigenschappen, en is reversibel, wanneer water opnieuw wordt toegevoegd (Volhard 2015, p41).

404. Schroeder 2016, p48

405. Schroeder 2016, pp 106,107,113-120

406. Door gebruik te maken van deze machines kan één persoon per uur ongeveer 100 m3 sterk verdichte bouwarme uitgraven (Schroeder 2016, p106).

407. Volhard 2015, p57 en Schroeder 2016, p106

De verdere verwerking dient om de gewonnen grond om te zetten in een homogeen, verwerkbaar materiaal dat verder kan worden gebruikt in de leempleister. Hierin wordt de bestaande structuur van de grond, met alle lokale onregelmatigheden, afgebroken en door elkaar gemengd. Zo kunnen de kleimineralen, die zich in de zeer fijne korreldeeltjes bevinden, extra watermoleculen opnemen. Hierdoor wordt hun binding met de grovere korrels losser en wordt de grond gemakkelijker verwerkbaar⁴⁰⁸. Dit kan op een natuurlijke manier gebeuren, door de grond bloot te stellen aan de weersinvloeden (zie onderdeel 'De wandvulling'), een manier waarbij tijd de belangrijke factor is. Op industriële schaal wordt echter logischerwijs een mechanische verwerking toegepast. De eerste stap is het grof vergruizen van de grond, waarbij de afgegraven kluiten ($d > 20\text{cm}$) worden gebroken tot fijnere agglomeraten ($d < 2\text{cm}$). Hiervoor worden gelijkaardige machines gebruikt als bij de verbrijzeling van kalksteen⁴⁰⁹. Vervolgens wordt de grof vergruisde grond gezeefd, een proces waarin steentjes, te grove grondkluiten⁴¹⁰, wortels etc. uit het materiaal worden verwijderd. Gangbare maaswijdten liggen tussen 2 en 7mm⁴¹¹. In industriële toepassingen worden de grote volumes grond gezeefd in machinale zeefsystemen zoals roterende of vibrerende zeven. Het is mogelijk dat het productieproces voor de kleideeltjes – of 'bouwleem tot 5mm' – in wand A op dit punt is gestopt. Een andere mogelijkheid is dat de verwerkte grond nog werd vermalen en 'gegranuleerd'⁴¹². Het vermalen geschiedt in een kogel- of walsmolen⁴¹³ en reduceert de kleigrond tot een poedervorm met korrelgrootte $< 0,063\text{mm}$. Voor het granuleren van dit poeder wordt een halfnat procedé gebruikt om het verhitte ruwe poeder te doen samenklitten tot een korrelgrootte van ca. 1-30 mm, met toevoeging van verneveld water.

De algemene werkwijze in het ontginnen en verwerken van kleigrondstoffen is tevens – en logischerwijs – toepasbaar op de productie van baksteen. 'Dit betekent dat veel van de voorbereidings-, vormings-, en droogmethoden vergelijkbaar zijn, op één verschil na: aan het eind van de technologische keten [van baksteen] is er een gebakken steen die, naast de speciale eisen aan de grondstof, ook meer energie voor het bakken nodig heeft'⁴¹⁴. De productie van de 'natuurlijke leem' vereist daarentegen slechts een zeer beperkte hoeveelheid energie. Boren of gebruik van explosieven is niet nodig, al hebben ook deze groeves een significante milieupact door hun omvang. Klei bouwafval – gebakken of niet – is steeds chemisch inert, maar de kleigrond in de basisleempleister is zelfs chemisch intact ten opzichte van zijn oorspronkelijke vorm. Daarom kan ook deze component in de natuur worden gestort na afbraak⁴¹⁵.

Productie, zand (zie Fig.33)

Net zoals in de kalkpleister dient het zand als deel⁴¹⁶ van het eigenlijk inerte skelet in de leempleister. Behalve dat het over een redelijk fijn zand gaat, met een korrelverdeling (0-2mm), en dat het gewassen werd, is geen informatie beschikbaar over het gebruikte zand in de leempleister. Er wordt aangenomen dat het over gezeefd en gewassen

408. Schroeder 2016, p112

409. Zo worden hiervoor de kaakbreker, impact hamer en zgn. 'pan grinder' gebruikt (Schroeder 2016, p114).

410. Deze kluiten worden verzameld en opnieuw grof vergruisd.

411. Schroeder 2016, p114

412. Waarschijnlijk is het verwerkingsproces voortgezet met de volgende stappen. Deze stappen zorgen er immers voor dat de basisidee achter de verwerking – het opbreken van de bestaande grondstructuur – verder wordt doorgedreven.

413. Een kogelmolen is een holle cilinder waarom zich losse kogels bevinden. Door de molen gedeeltelijk met grond te vullen en te roteren rond haar as, malen de kogels de grond fijn. Bij een walsmolen wordt de grond fijngemalen tussen een zware, roterende cilinder en een horizontaal oppervlak (Schroeder 2016, pp 117,118).

414. Schroeder, p112

415. Berge 2009, pp 121,122

416. In de kleideeltjes zit ook een deel zand.

rivierzand gaat, waarvoor wordt verwezen naar onderdeel 'A1. Basislaag kalkpleister: productie, kwartszand'.

Productie, strovezels (zie Fig.33)

De uitgeharde leempleister wordt gewapend door versnipperde of gehakte gerststrostengels (tot 30mm lengte), die de pleister van een zekere treksterkte voorzien en zo barsten en erosiewerking⁴¹⁷ verminderen, maar ook bijdragen aan de isolerende en vochtregulerende⁴¹⁸ eigenschappen van de pleister. Voor de productie van stro wordt verwezen naar onderdeel 'C3. Stroleem'. In wand D wordt stro dan weer onder de vorm van balen aangewend.

Het reduceren van strobalen tot vezels is geen complex proces, en berust volledig op landbouwmachines. De balen worden met een vorklift (**diesel**) in de verzamelkuip van een balenhakselaar (**diesel of elektriciteit**) geladen, die de balen vervolgens fijnhakt en de strovezels via een transportband op een hoop stort.

A9. Leemfinish

De laatste laag die langs de binnenkant van wand A werd gezet was de leemfinish. In feite is deze leempleister juist dezelfde als de basis leempleister A8. Enkel de kleideeltjes verschillen; voor de finish werd een 'witte' kleigrond⁴¹⁹ gebruikt, maar ook hier is het productieproces volledig gelijkaardig. De keuze voor deze kleigrond werd gemaakt vanuit esthetische overwegingen, aangezien de het aandeel witte grond de afwerkingspleister een lichte kleur geeft (zie Fig.18). De 20mm dikke basis leempleister en het daarin gestreken wapeningsnet werd aldus afgewerkt met een 10mm dikke afwerking. Eerst werd deze laatste laag op de basispleister gespoten en afgestroken met een rijlat. Nadat de laag vervolgens voldoende was gedroogd en uitgehard, werd ze nog even 'vochtig gesponst' en een laatste keer afgestroken, om de gewenste oppervlaktetextuur te bekomen⁴²⁰.

Op deze manier wordt de binnenkant van wand A afgewerkt met een leempleisterlaag die een aanzienlijke dikte bezit (minstens 30mm). 'De bedoeling van het lemen', aldus de pleisterwerker, 'is dan ook een vochtregulerend vermogen in huis te brengen, en doordat je deze laag dikker kan zetten, gaat dit [...] er zijn'⁴²¹. Vocht kan een aarden gebouwcomponent binnendringen als vloeistof of gas door de hygroscopische eigenschappen van het materiaal en de open poriënstructuur van onderling verbonden haarvaten. Afhankelijk van de verschillen in vochtigheid, temperatuur en dampspanning tussen het materiaal⁴²² en het aangrenzende binnenklimaat, kan vocht door het bouwelement worden getransporteerd, erin worden opgeslagen en weer worden vrijgegeven aan de binnenlucht⁴²³. Het is deze eigenschap die geogebaseerde materialen hun vochtregulerend vermogen geeft en die ervoor zorgt dat aardebouw steevast wordt gepresenteerd én geprezen als ademend, heilzaam voor de kwaliteit van de binnenlucht, en zelfs ventilerend. Zo is er nergens in woning A een ventilatiesysteem

417. Uiteraard betreft dit geen erosie onder invloed van de weersinvloeden, maar wel erosie door gebruik van het gebouw; aanrakingen, plaatsen van meubels,...

418. Zie onderdeel 'A9. Leemfinish'.

Basisleem met stro

L x H x B [mm]	nvtxnvtx10
p [kg/m3]	~ 1600
Buigtreksterkte [N/mm2]	0,7
Druksterkte [N/mm2]	1,5
Hechtsterkte [N/mm2]	0,1
λ [W/mK]	0,91
c [J/kgK]	nvt

* Alle waarden werden bekomen uit (CLAYTEC 2021).

419. Met 'wit' wordt eerder een zeer lichtbeige kleur bedoeld (De Jonghe 2022).

420. De Jonghe 2022

421. Ibid.

422. De mate waarin vocht wordt opgenomen door een materiaal is afhankelijk van de relatieve luchtvochtigheid en het evenwichtsvochtgehalte van het materiaal. Dit verwijst naar het vochtgehalte dat zich in een materiaal instelt als de gemiddelde waarde gedurende de nuttige levensduur van het gebouw, en hangt zowel af van de poriënstructuur als van de minerale samenstelling van de kleipartikels. Voor een grondmengsel situeert dit vochtgehalte zich rond de 3% (Schroeder 2016, pp 407, 408).

423. Schroeder 2016, p404

geïmplementeerd. Zelfs in de keuken, waarvan de muren en het plafond met leempleister zijn afgewerkt, is er geen dampkap of andere afzuiging.

Er kunnen echter een aantal kritische bemerkingen worden gemaakt bij het vochtregulerend karakter van aarde gebouwcomponenten. Zo is het aandeel aarde in wand A op de juiste plaats geconcentreerd: als een pleister aan de binnenkant van de wand. Het zijn immers 'alleen de eerste 1-2 cm van het oppervlak van het gebouwcomponent [die] een effect [hebben] op het binnenklimaat wat betreft het in evenwicht brengen van snel wisselende dampspanningen in de binnenlucht'⁴²⁴, die optreden door huishoudelijke activiteiten en menselijke bezetting. De hygroscopische adsorptie⁴²⁵ van vocht is immers een traag en graduueel proces, waarbij het vochttransport in vergelijking met hygiënische ventilatie bijna nihil is. Aldus dragen diepere lagen in de wandopbouw nauwelijks bij aan hygroscopische vochtregulatie, of alleen op de lange termijn^{426 427}. De vochtbuffering in de kalkhennep A5, zou dus enkel kunnen optreden op middellange termijn, door bijvoorbeeld te reageren op het verschil in relatieve luchtvochtigheid tussen de zomer en winter. Uiteindelijk kan vocht in de lucht enkel worden geadsorbeerd binnen de grenzen van het evenwichtsvochtgehalte, dat voor aardematerialen zeer laag ligt. Het idee dat een ruimte passief kan worden bevochtigd door een leempleister is dan ook onrealistisch, maar het drogen van een ruimte kan in een residentiële context, waarin typisch een lage bezetting heerst voor de beschikbare oppervlakte⁴²⁸, tot op zekere hoogte wel werken op deze manier, aangezien 'droogte aarde haar bijzondere kwaliteit is'⁴²⁹. Het is tevens deze eigenschap die van de combinatie van 'aarde en planten' zeer duurzame gebouwcomponenten maakt. Droog hout, stro, wilg etc. hebben een hoger evenwichtsvochtgehalte dan droge aarde; ca. 10% tegen 3%. Indien het aardemateriaal altijd droog wordt gehouden en beide bouwmaterialen permanent verbonden zijn waardoor een effectieve vochtdiffusie mogelijk wordt, ontstaat een gradiënt van het evenwichtsvochtgehalte van het hout naar het aardemateriaal: de aarde houdt het hout droog en heeft een conserverende werking⁴³⁰.

En wat dan met inwendige en oppervlakte-condensatie in het geval van de dampopen wand A? Schroeder (2016) stelt dat bouwmaterialen van droge aarde onder normale gebruiksomstandigheden een voldoende capillariteitsgraad bezitten waardoor condensaat dat zich op de oppervlakken van de bouwelementen vormt, goed wordt verdeeld doorheen het materiaal door capillaire werking. Zolang de wand voldoet aan de minimale thermische isolatie-eisen, kan het binnendringen van vocht daarom worden voorkomen. Inwendige condensatie – wat meestal optreedt in de winter – kan in beperkte mate door dezelfde capillaire werking worden verdeeld en op termijn afgestaan aan de binnen- of buitenlucht zonder dat schade wordt berokkend aan de wand⁴³¹. Om de vorming van inwendige condensatie tot een minimum te beperken moet de dampdiffusieweerstand van een wand in principe afnemen, en de warmteweerstand toenemen, van binnen naar buiten toe⁴³². Dat laatste is niet geval in wand A. Het plaatsen van een dampscherm is volgens Volhard (2015) dan ook weer allerm minst gepast, omdat het de verdamping van capillair geleid vocht – afkomstig van buiten – aan de binnenzijde voorkomt, en het zo insluit in de wand⁴³³.

424. Ibid., p408

425. De hygroscopische adsorptie van vocht is de verzameling van water aan het oppervlak van de capillairen, inwendig in het aardemateriaal, als gevolg van een toename van de relatieve luchtvochtigheid binnen. Dit proces vereist poriëndiameters $\leq 0,1 \mu\text{m}$ (Schroeder 2016, p404).

426. Een significante toename in luchtvochtigheid op lange termijn zou overigens niet mogen optreden in een residentiële toepassing.

427. Volhard 2015, pp 213,214

428. Dit geldt in het bijzonder voor woning A, wat een zeer ruime eengezinswoning is. In de dubbelhoge leefruimte, waar zich ook de keuken bevindt, is de gehele binnenoppervlakte – muren en plafond – afgewerkt met de leempleister.

429. Volhard 2015, p214

430. Schroeder 2016, p408

431. Ibid., p407

432. Volhard 2015, p218

433. Vocht dat door capillaire werking wordt getransporteerd (inclusief neerslag die de constructie van buitenaf bereikt), verplaatst zich altijd naar de drogere kant – in de winter dus naar binnen – waar het dan aan het muuroppervlak kan verdampen (Volhard 2015, p219).

Fig.26:
A1. Basislaag Kalkpleister
Flowchart productie

Percentages worden uitgedrukt in volumedelen van de aangebrachte pleister.

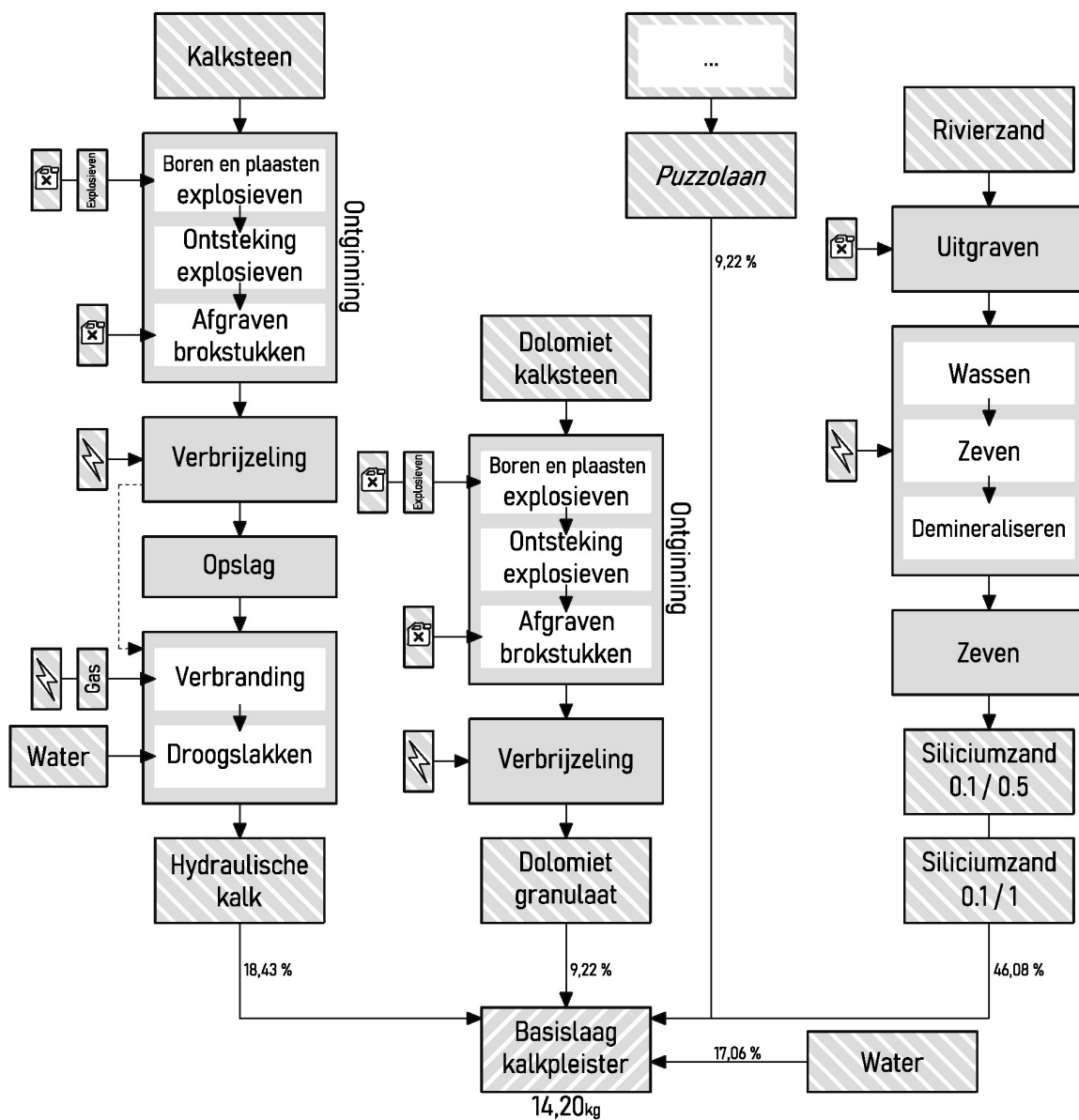
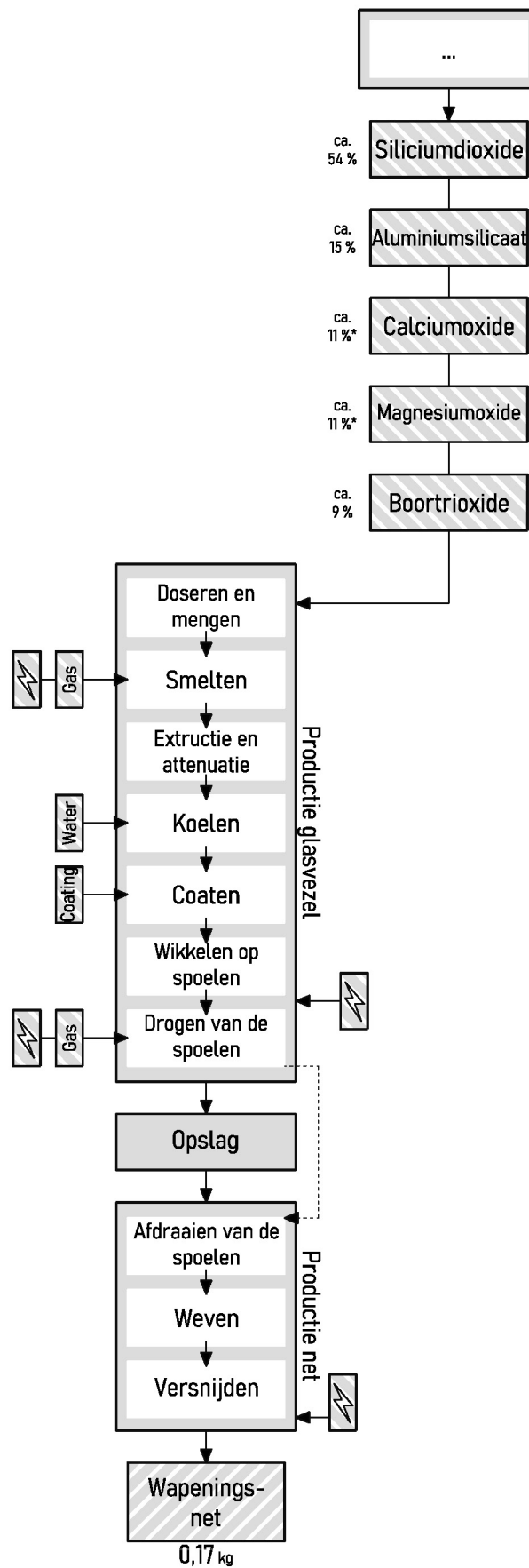


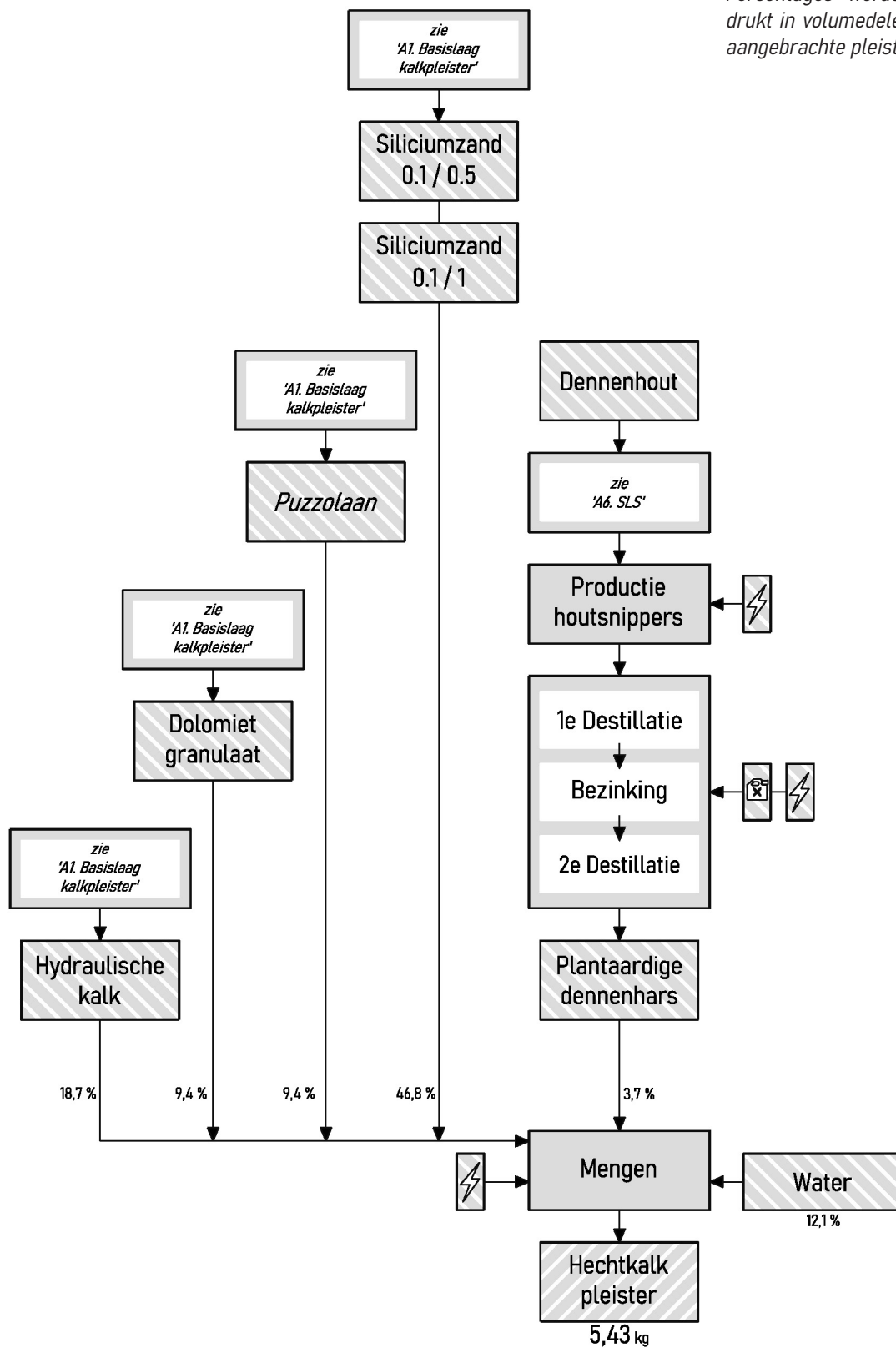
Fig.27:
A2. Wapeningsnet
Flowchart productie



Percentages worden uitgedrukt in volumedelen van de glasvezelsmelt.

Fig.28:
A3. Hechtalkpleister
Flowchart productie

Percentages worden uitgedrukt in volumedelen van de aangebrachte pleister.



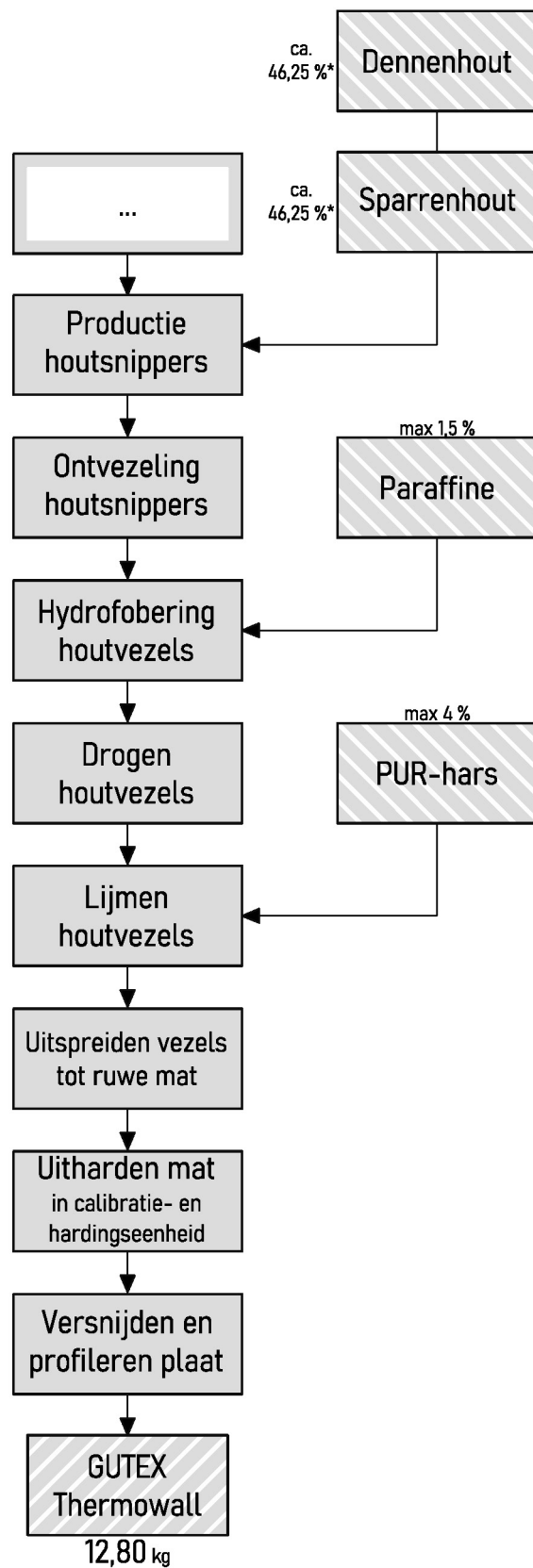


Fig.29:
A4. GUTEX Thermowall:
Flowchart productie

Percentages worden uitgedrukt in massaprocenten van het finale product.

*Er wordt aangenomen dat het aandeel hout uit gelijke delen spar en den bestaat.

Fig.30:
A5. EXIE Canadry
Flowchart productie

Percentages worden uitgedrukt in volumedelen van de aangebrachte kalkhennep.

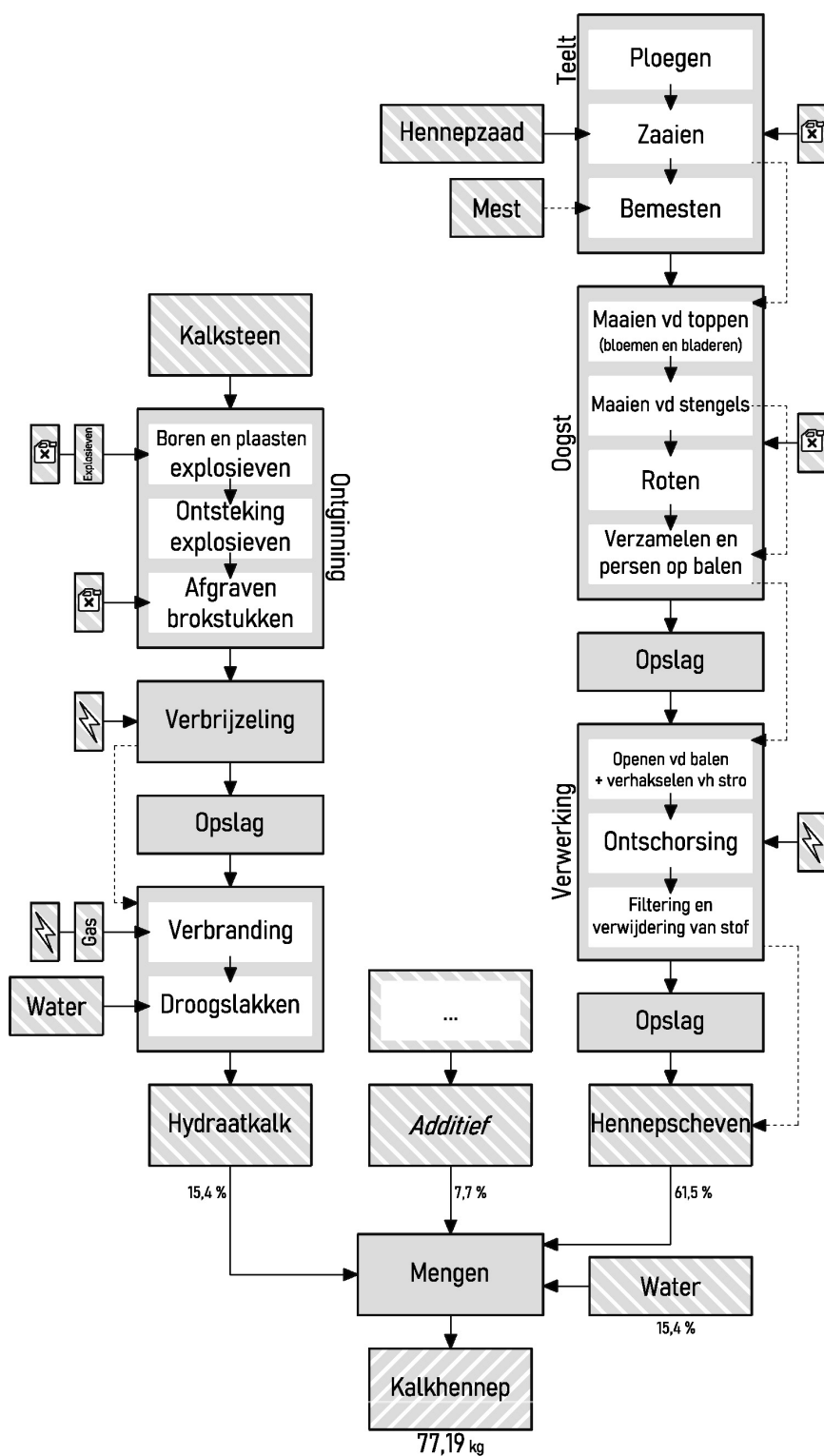


Fig.31:
A6. SLS geïmpregneerd
Flowchart productie

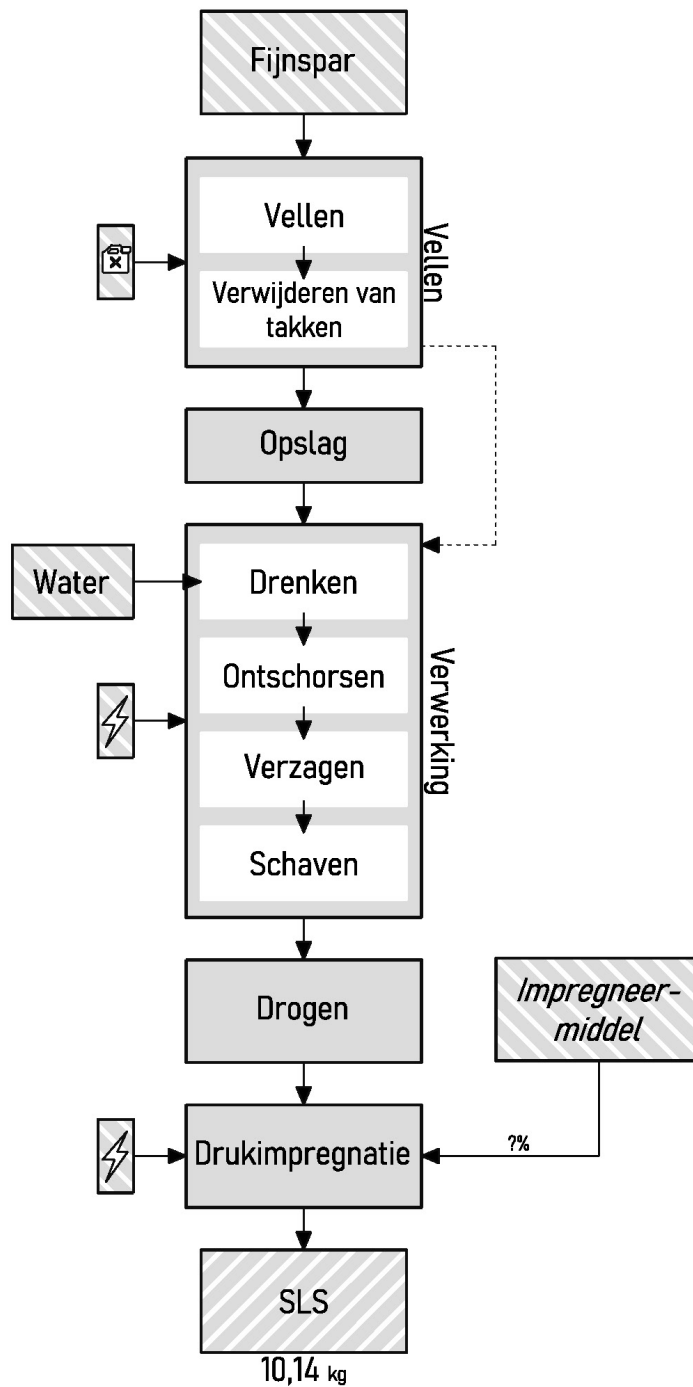
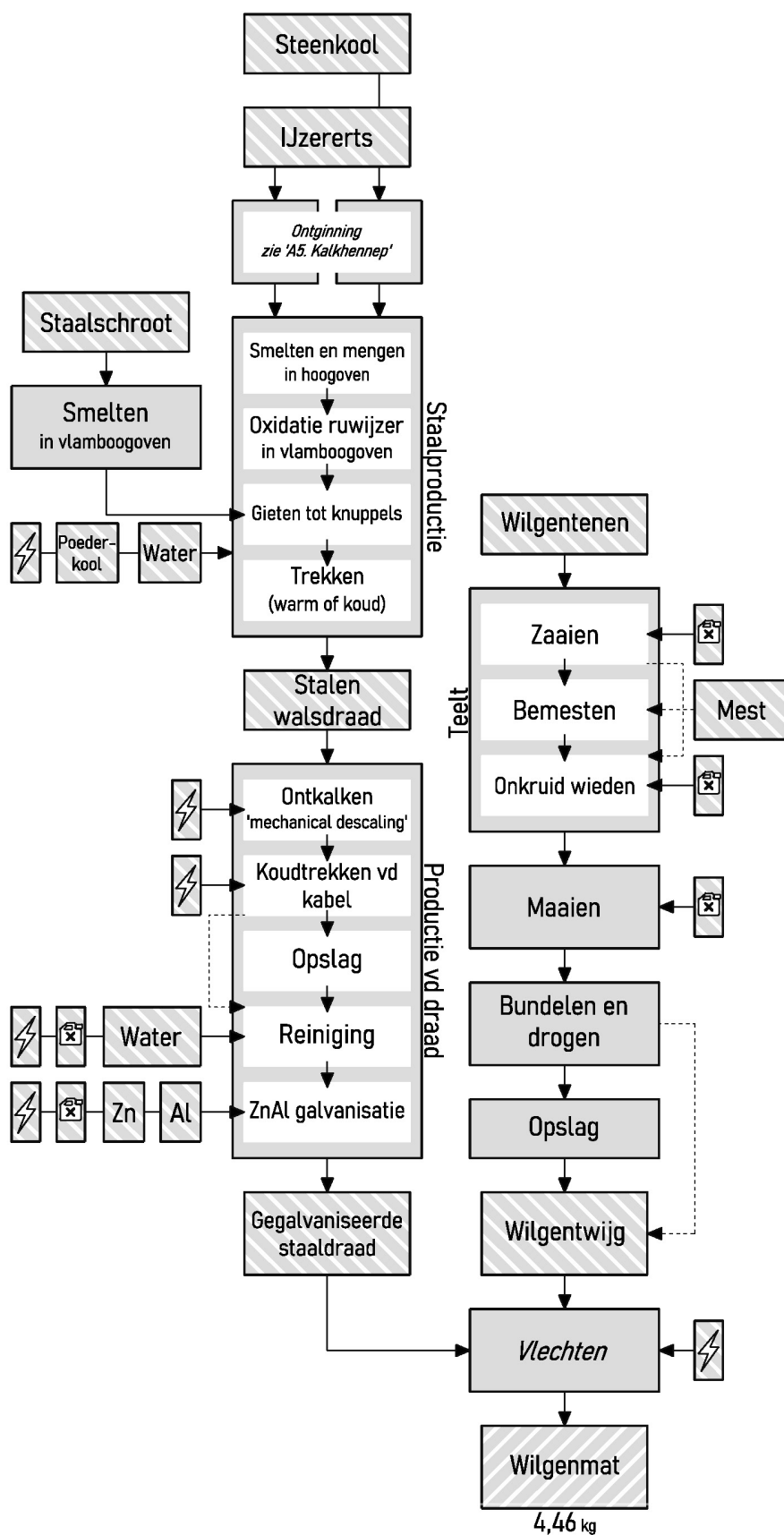


Fig.32:
A7. Wilgenmat
Flowchart productie



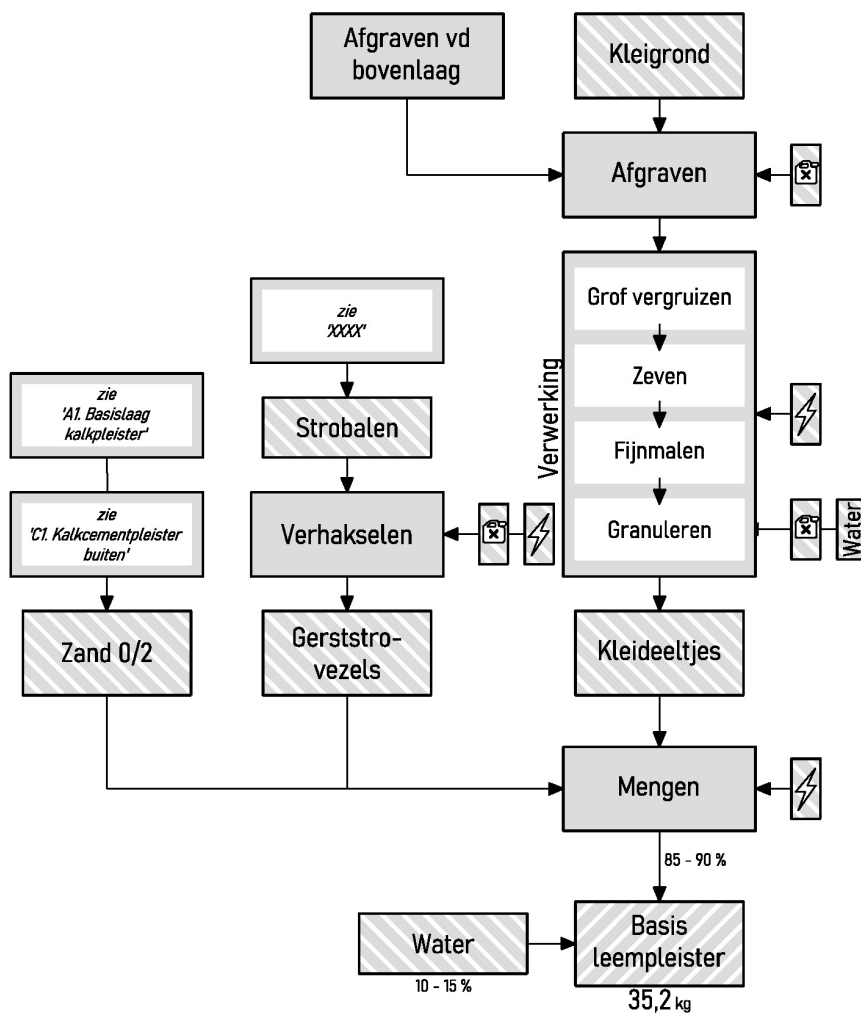


Fig.33:
A8. Basis leempleister
Flowchart productie

Percentages worden uitgedrukt in volumedelen van de aangebrachte pleister.

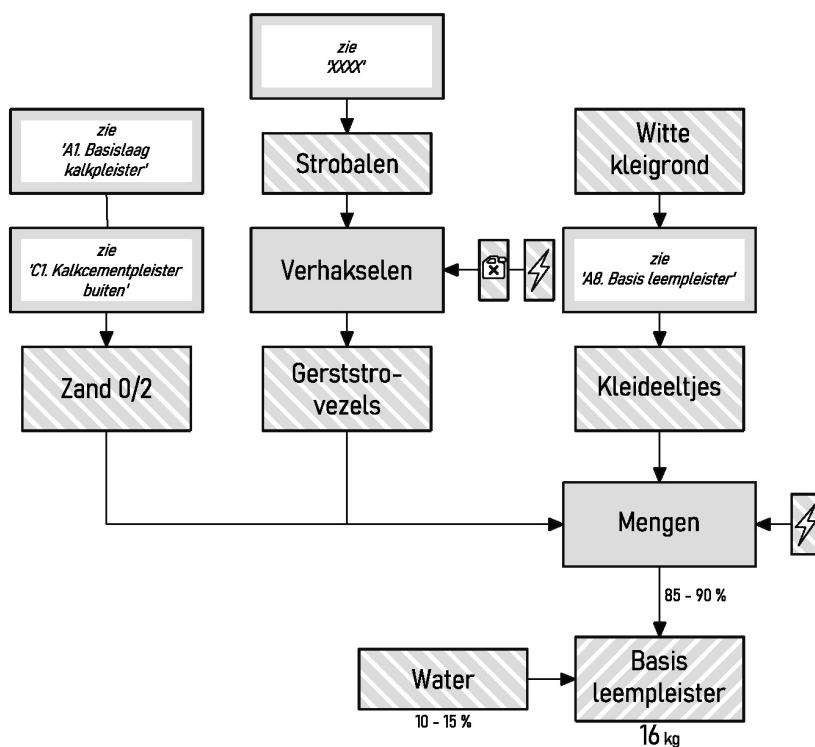


Fig.34:
A9. Basis leempleister
(finish)
Flowchart productie

Percentages worden uitgedrukt in volumedelen van de aangebrachte pleister.

Wand B: Kalkhennep in renovatie, Edegem

Wand B maakt deel uit van een renovatieproject in Edegem⁴³⁴ (zie Fig.35). Het gaat over een duplex rijwoning die energetisch wordt gerenoveerd⁴³⁵: de ruwbouw (muren in baksteenmetselwerk, plat dak/verdiepingsvloer/vloer boven de kelder hebben een houten draagconstructie) is op enkele nieuwe doorvoeringen na behouden, maar de isolatieschil en afwerking langs binnen en buiten (behalve aan de voorgevel) werden al volledig herdaan⁴³⁶. Wand B bevindt zich op de eerste verdieping, aan de achterkant van de woning (zie Fig.36 , en geeft uit op het plat dak. De oude baksteenwand behoudt zijn dragende functie, maar werd in het voorjaar van 2020 geïsoleerd met een 30cm dikke laag kalkhennep die wordt vastgehouden aan de muur met behulp van isolatiehaken en houten stijlen. Zowel langs binnen als langs buiten werd de wand afgewerkt met kalkpleisters die uit meerdere lagen bestaan.

Ter verduidelijking van de opbouw wordt verwezen naar Fig. 59 . Een detail van de muuraanzet (aansluiting op het plat dak) is getekend in Fig. 60 .

Toen het houten draagstructuur van het nieuw stuk plat dak was geplaatst, kon worden begonnen met de kalkhennep muur. Om te beginnen werden 8 op maat gezaagde houten balken (B3) over de breedte van de wand bevestigd met hoekijzers. Tussen deze stijlen en de baksteen werd ongeveer 6cm vrije ruimte gelaten, aangezien dit houtskelet als ingekapselde ruggengraat zou gaan fungeren voor de latere kalkhennep (B4), die te weinig zelfdragend is om een wand van 30cm dikte mee te bouwen⁴³⁷. Om de kalkhennep te kunnen storten werd gewerkt met een opschuivende bekisting uit OSB platen (zie Fig.38). Bij elke fase werd een kleine 50cm gestort en licht aangedamd. Door stukken PVC buis van 10cm lengte als afstandshouder te gebruiken, kon de OSB telkens op een gepast afstand aan de stijlen worden vastgemaakt met lange schroeven. Nadat de laag kalkhennep na enkele uren voldoende was uitgedroogd, werden de bekistingsplaten en de stukken buis losgemaakt om te worden hergebruikt. Waar een buis had gezeten bleef telkens een gat over dat nadien kon worden toegestopt met kalkhennep. Tijdens dit hele proces werd de wand afgedekt tegen de regen om de kalkhennep te beschermen. Het buitenoppervlak dat op deze manier werd bekomen is een goede ondergrond om een kalkpleister op te zetten, die ook in deze wand dient als bescherming tegen weersinvloeden. Langs de buitenkant bestaat de pleister uit 2 lagen. De eerste laag is een ca. 20mm dikke 'scratchcoat' (B2), die een goede basis vormt voor de 10mm dikke 'floatcoat' (B1), waarmee de buitenkant wordt afgewerkt. Langs de binnenkant wordt de kalkpleister gezet op een bakstenen ondergrond en gebeurt dit – net zoals aan de buitenkant – op een klassieke manier. Eerst werd een scratchcoat (B5) gezet, 15mm dik, en vervolgens een 5mm dikke floatcoat (B6). Binnen werd wand B afgewerkt met een 10mm dikke 'finishing coat' (B7), welke een louter esthetische functie heeft⁴³⁸.

De ambitie in woning B was om 'de manier waarop je nu een huis zou willen verbouwen, te gaan verzoenen met traditionele bouwmethodes'⁴³⁹ en daarmee was het project vanaf haar start één van volledige zelfbouw. Zo is deze verbouwing al meer dan 2 jaar de hoofdbezigheid van de zoon van de eigenaar, en is de eigenaar zelf naast zijn beroep er ook voltijds aan het werk. Deze relatief lange tijdsduur is toe te schrijven aan het feit

434. De contactpersoon, zelfbouwer en zoon van de eigenaar van de woning, is Victor Everaerts, waarnaar vanaf nu zal worden gerefereerd als de eigenaar.

435. De werken werden aangevangen in 2019, en zijn op het moment dat deze scriptie wordt afgerond, midden 2022, grotendeels afgerond.

436. Bovendien werden de aanbouswels aan de achterkant afgebroken en vervangen door een verlenging van de leefruimte.

437. Deze beperking gold in de concrete situatie van wand B, maar is algemeen geldig voor kalkhennep die wordt gestort. Met geprefabriceerde kalkhennepblokken zou de constructie van deze 'voorzetswand' wel mogelijk zijn geweest.

438. De finishing coat heeft een zeer fijne oppervlaktetextuur en een lichte kleur, maar de float coat, die het ongelijkmatige oppervlak van de scratch coat egaliseert en hiermee 1 laag vormt, kan evengoed als afwerking dienen.

439. Everaerts 2022

dat elk materiaal zelf werd uitgedacht en geplaatst door mensen met een beperkte ervaring, in wat soms een trail-and-error proces was⁴⁴⁰. Wat dat betreft werd de constructie van wand B dan ook gekarakteriseerd door een afwezigheid van aannemingsbedrijven of externen, en doordat de kalkhennep en kalkpleisters uit afzonderlijk aangekochte componenten in situ werden samengesteld⁴⁴¹. Het houtskelet was het minst complexe onderdeel van de wand om te plaatsen. Het maken van het kalkhennepmengsel in een betonmolen vereiste meer aandacht, waarbij er vooral over moest worden gewaakt dat de hennepvezels goed mengden met de natte kalk. Het pleisteren van de wanden – zowel aan de binnen- als buitenkant – was echter het meest complexe proces. De scratchcoat werd manueel aangebracht, afgestreaken met een rijlat en ‘opgewreven’ met een getand mes (zie Fig.39). Deze laag moet volledig droog zijn alvorens de floatcoat er op te zetten, wat enkele weken in beslag kan nemen. De floatcoat werd in een dünnere laag aangebracht met een plakspaan, en nivelleerde het nog onregelmatige oppervlak van de scratchcoat⁴⁴². Na enkele dagen droging was deze laag nog licht vochtig in de massa, wat het moment was om binnenin de woning de finishing coat aan te brengen. Deze 10mm dikke laag werd in 2 keer gezet. Nadat een volledige muur een eerste keer was bezet, moest men hier meteen een nieuwe laag opzetten, zodat er nat-in-nat werd gewerkt. Vervolgens liet men deze tweede laag ‘een beetje’ uitharden, om dan de nog vochtige finishing coat opnieuw nat te maken met een spons of borstel. Door deze bevochtiging werd de fijne en nog vochtige kalk naar het oppervlak geduwd, vervolgens kon die met een plakspaan glad worden afgestreaken tot de gewenste oppervlaktetextuur. Langs de buitenkant werd de floatcoat wel nog vochtig ‘opgesponst’ maar niet meer afgestreaken, waardoor een korrelige afwerking werd bekomen.

Van alle wandonderdelen was het met name de gelaagde structuur van deze kalkpleisters (zie Fig.40), en hun licht verschillende behandelingen, die een goede planning en bij momenten een hoge snelheid van uitvoering vereiste, wat voor de eigenaars een behoorlijk leerproces was. Dat dit een traag proces was ligt niet enkel aan de betrokkenen, maar is ook eigen aan het gebruikte materiaal. Zo schat de eigenaar in dat het zetten van de binnenpleisters op een muur op het gelijkvloers – minstens en ongeveer – 0,8 manuren/ m² of 50 min/ m² kostte zonder droogtijden⁴⁴³, wat veel is in vergelijking met een traditionele, éénlagige gipspleister.

440. Zo heeft het pleisteren van de binnenmuren maanden in beslag genomen. In de pleistersamenstelling die aanvankelijk werd gebruikt was niet het juiste zand ingemengd, waardoor de pleister na uitharding over een zeer lage hechtsterkte beschikte en ‘zo van de muur kon worden gestoken’ (Everaerts 2022). Het juiste zand (wat uiteindelijk fijn wit zand bleek) diende een korrelverdeling te hebben die compatibel was met de gebruikte mengeling van hydraatkalk en puzzolaan, wat op voorhand niet geweten was.

441. Dit gegeven heeft er ook voor gezorgd dat het toekennen van bepaalde materiaaleigenschappen veeleer op een inschatting berustte en dus eerder als indicatie moet worden beschouwd dan als correcte waarde.

442. De scratchcoat is nog zodanig grof, dat indien de finishing coat hier rechtstreeks zou worden opgezet, een ongelijkmatige droging zou optreden, met scheurvorming als gevolg (Everaerts 2022).

443. De eigenaar spreekt over een tijdsduur van 10 uur voor een wand van 4 x 3m. Overigens gingen de pleisterwerken op deze wand zeer vlot (Everaerts 2022).



Fig.35:
Wand B: context

Wand B maakt deel uit van de buitenmuur op de 1e verdieping aan de achterkant van een gerenoveerde rijwoning uit Edegem.

De voorgevel, te zien op de foto, werd eveneens geïsoleerd met kalkhennep en afgewerkt met een kalkpleister, maar langs de binnenkant.



Fig.36:
Wand B

De beschouwde buitenmuur aan de achterkant is zuid-oostelijk georiënteerd, en geeft uit op een plat dak.



Fig.37:
Wand B: detail afwerking

Deze foto laat de afwerking van het wandoppervlak aan een raamopening zien. De aangeduide lengte bedraagt 24cm.

De vochtplekken treden vaak op na regenbuien, maar drogen dan ook weer snel uit, en berokkenen geen schade aan de wand.



Fig.38:
Wand B: kalkhennep

De kalkhennep werd met emmers tussen de oude muur en een opschuivende bekisting geschept, en vervolgens licht aangedamd.

Kalkhennep kan niet worden blootgesteld aan aan uitvoerige regen, en werd daarom afgeschermd.

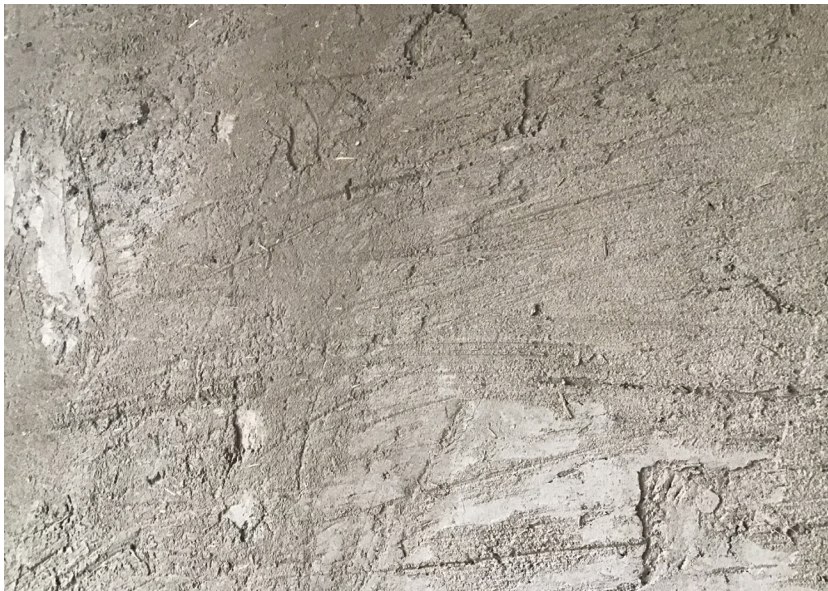


Fig.39:
Wand B: scratchcoat

De scratchcoat was de eerste pleisterlaag op de ondergrond en had een ongelijkmatig oppervlak, wat werd opgeruwd met een getand mes.



Fig.40:
Wand B: 3 pleisterlagen, binnen

Deze foto laat de 3-delige afwerking aan de binnkant zien: de scratchcoat, de floatcoat en de finishing laag.

Fig. 41:

Wand B type m2

buiten

Buiten kalkpleister

- | | |
|----------------|-------|
| 1. Floatcoat | 10mm |
| 2. Scratchcoat | 20mm |
| 3. Houtskelet | 140mm |
| 4. Kalkhennep | 300mm |

Metselwerk

280mm

Binnen kalkpleister

- | | |
|-------------------|------|
| 6. Scratchcoat | 15mm |
| 7. Floatcoat | 5mm |
| 8. Finishing coat | 10mm |

binnen

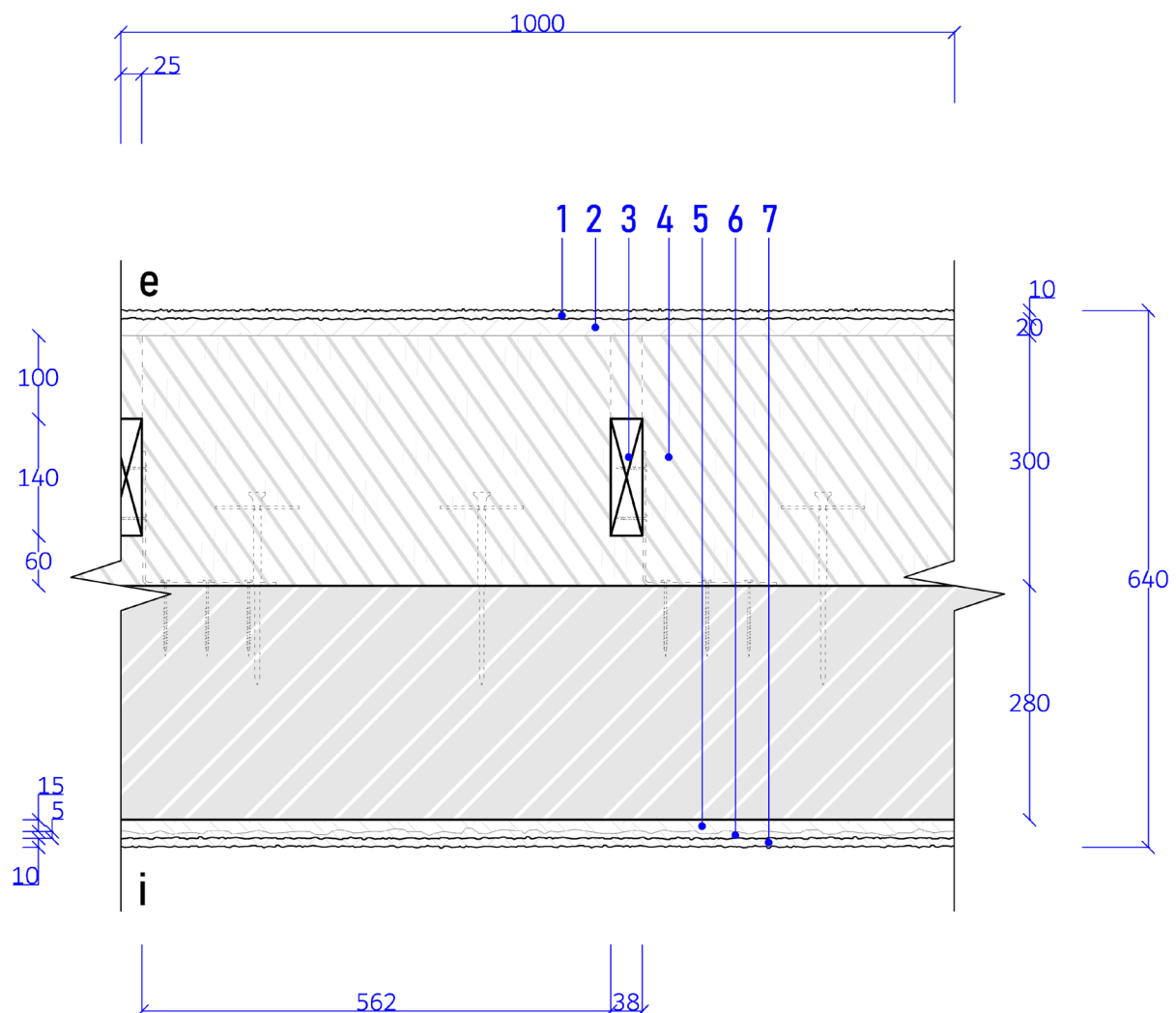


Fig. 42:

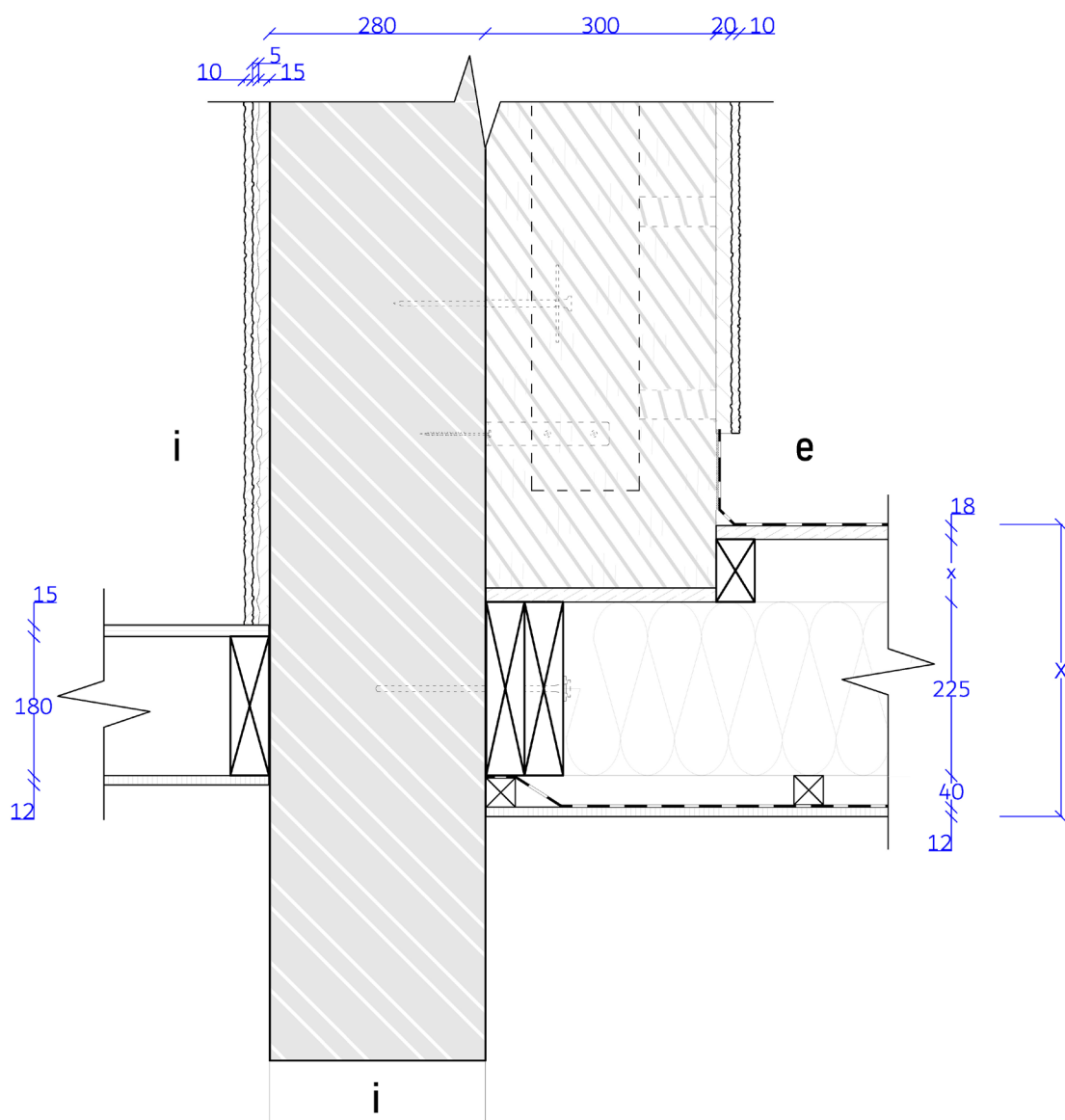
Wand B muuraanzet

Dakopbouw

buiten

EPDM	1,5mm
OSB	18mm
Hellingsspieën	
Houten balk	225mm
Houtwoldeken	220mm
Pannenslat	38mm
Dampscherm	0,2mm
Gyproc	12mm

binnen



B1. Floatcoat kalkpleister, buiten

Algemeen

De buitenste laag van wand B is de floatcoat van de pleisterbezetting. Deze pleister werd op de werf gemengd in een elektrische betonmolen en is samengesteld uit 1 deel hydraatkalk, 1,25 delen tras en 4 delen rijnzand. De hoeveel water die werd toegevoegd om een smeerbare massa te bekomen is niet gekend, maar wordt geschat op 2 delen⁴⁴⁴. De hydraatkalk en tras werden aangekocht bij de firma Jordan & Co en het rijnzand is afkomstig van de verdeler BMB Bouwmaterialen, beiden gelegen in Kalmthout.

Zoals eerder vermeld, diende de floatcoat om het oppervlak van de eerder aangebrachte en volledig uitgeharde scratchcoat egaal af te werken. Op deze manier werd 1 kalkpleisterlaag gevormd ter bescherming van de kalkhennep. Op Fig.37 is te zien hoe de poreuze structuur van de kalkpleister vorming van vochtplekken toelaat na regenval. Na enige tijd drogen deze echter weer uit door het dampopen karakter van de pleister, al zijn er ten heden verschillende vlekken te bemerken waar deze op de pas nieuwe pleister nog niet waren – wat overigens geen consequenties heeft voor de duurzaamheid van de wand⁴⁴⁵.

Productie, rijnzand (zie Fig.48)

De ontginning van rivierzand en haar eigenschappen als inert skelet in een pleister werden al besproken in onderdeel 'A1. Basislaag kalkpleister'. Rijnzand is in België een verzamelnaam voor alle soorten rivierzand⁴⁴⁶ met een 'scherpe structuur'⁴⁴⁷. De precieze locatie van ontginning en verwerking is voor het beschouwde zand niet gekend. Door hun onregelmatige vorm bieden de zandkorrels meer hechtoppervlak aan de bindingsmiddelen dan zandsoorten met een 'afgeronde korrel', met een sterkere pleister als gevolg. Het betreft een fijn zand, met korrelverdeling (0-2 mm).

Productie, hydraatkalk (zie Fig.48)

Zowel haar bindende werking in een kalkpleister als het productieproces van hydraatkalk werd al uitvoerig besproken in onderdeel 'A5. Kalkhennep'. De kalk die werd gebruikt in wand B betreft **SuperCalco® 97** van de fabrikant Carmeuse⁴⁴⁸, een product dat uit 97% zuivere hydraatkalk bestaat. De uiterst zuivere kalksteen die hiervoor werd gebruikt is ontgonnen in de Maasvallei, in groeves te Seilles en Moha, en werd gebrand in een productielijn in Moha. De kalk werd vervolgens in bulk opgeslagen in een magazijn van Jordan & Co in Brussel, alvorens verplaatst te worden naar het verkooppunt in Kalmthout⁴⁴⁹.

Op onderstaande kaart is het transport voorgesteld vanaf de kalkgroeve.

Floatcoat, buiten

L x H x B [mm]	nvtxnvtx10
ρ^* [kg/m ³]	~ 1430
Treksterkte [N/mm ²]	nvt
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ^{**} [W/mK]	~ 0,3
c^{**} [J/kgK]	~ 1000

* Gewicht van de natte pleister.

** Waarde bij ontstentenis, gebaseerd op A1: Basislaag kalkpleister.

444. Naar analogie met 'A1. Basislaag kalkpleister', waar per 25kg droge pleistermix 5 liter water diende te worden toegevoegd.

445. Everaerts 2022

446. Oorspronkelijk werd dit zand in de Rijnregio gewonnen, tegenwoordig gebeurt dit ook op verschillende andere locaties. Bij de classificatie als 'rijnzand' gaat het niet om de herkomst, maar om eigenschappen en korrelgroottes van een zandsoort (Kranendonk B.V. z.d.).

447. Remondis Corneillie nv 2022

448. Carmeuse 2015

449. Jordan 2022

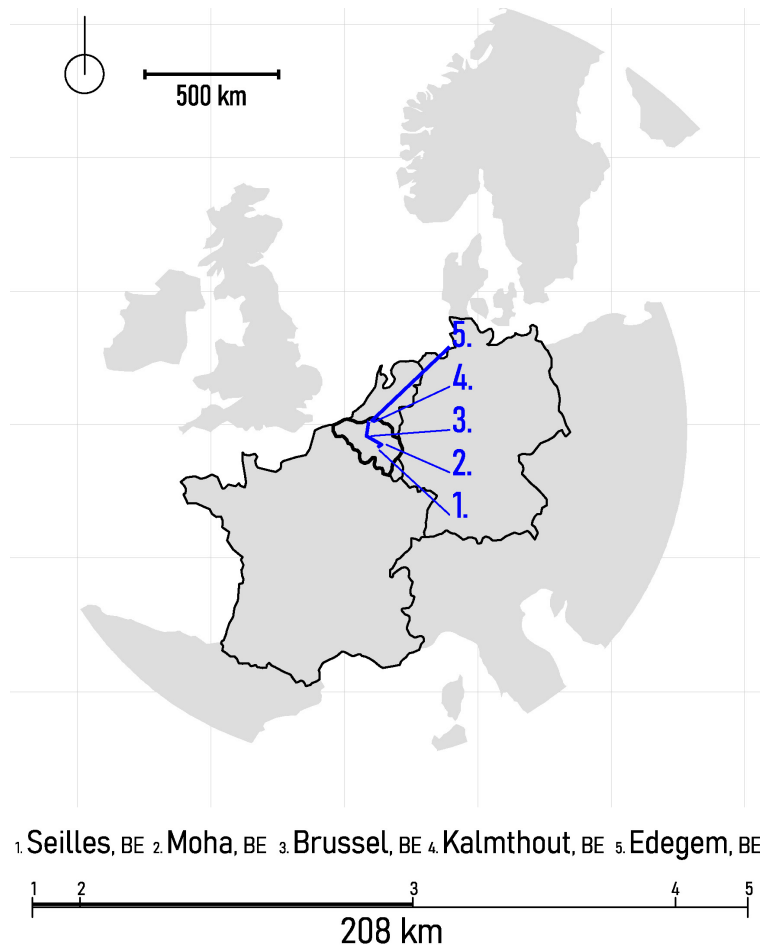


Fig.43:
Transport: Carmeuse hydraat-
kalk

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

Productie, tras (zie Fig.48)

Tras is een natuurlijk puzzolaan, die wordt gemaakt door het breken en fijnmalen van tufsteen⁴⁵⁰. De reactie van puzzolanen met de hydraatkalk levert een bijdrage aan de snelheid van het verhardingsproces en aan de uiteindelijke sterkte van de kalkpleister. Door de reactie met de hydraatkalk vormen puzzolanen immers een hydraulisch bindmiddel, waardoor de pleister ook uithardt door de reactie met water, bovenop de tragere carbonatatie van de luchtkalk⁴⁵¹. De tras werd ontgonnen in Kruft, Duitsland door het bedrijf Trasswerke Meurin. Nadien werd het in bulk opgeslagen in het magazijn van Jordan & Co in Brussel, alvorens verplaatst te worden naar Kalmthout⁴⁵². De productie van tras berust op **diesel** voor graafmachines en **gemechaniseerd transport** (kiepwagens, vrachtwagens en bulkauto's) en **elektriciteit** voor de verwerking van de steen.

De grondstof van tras is tufsteen, een gesteente dat enkel in de Duitse Vulkaaneifel voorkomt. Dit relatief zachte gesteente is ontstaan door verharding van 'ignimbitische tufafzettingen', wat zeer hete wolken vulkanische as, waterdamp en vulkanische gassen zijn die tijdens het Tertiair en Kwartair door de Eifelvulkanen werden uitgestoten. Ten gevolge van de snelle afkoeling na uitbarsting van de ignimbriet versterkte de massa tot een glasachtige materie. Het is aan deze

450. Tufsteen is een sedimentair gesteente dat grotendeels bestaat uit gecompacteerd vulkanische as.

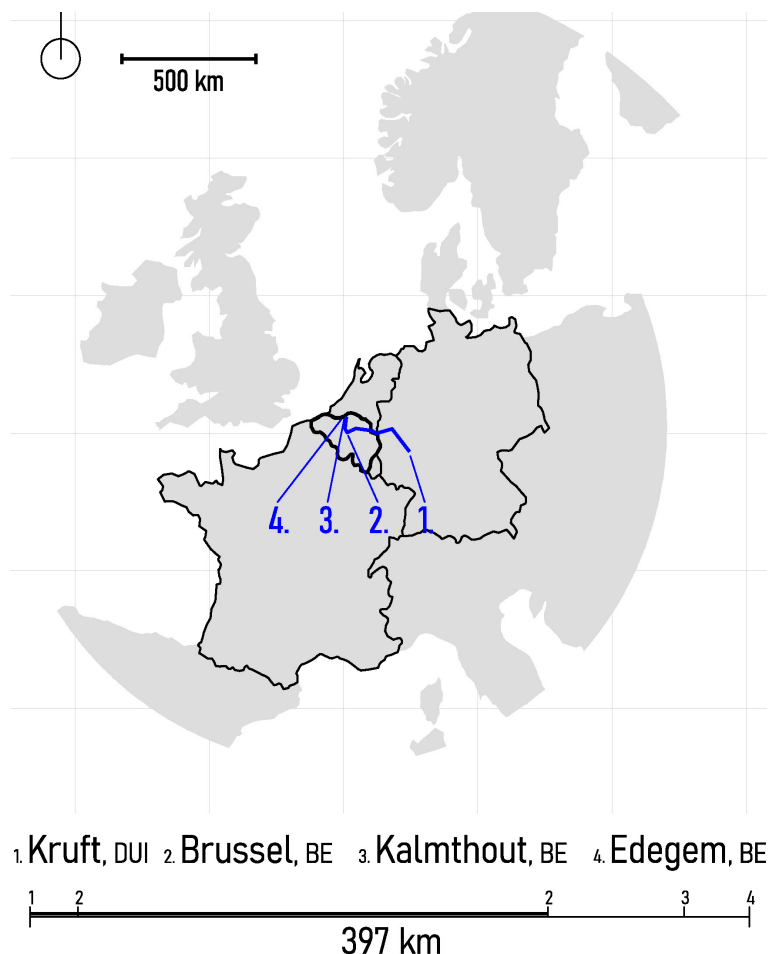
451. Zie onderdelen 'A1. Basislaag kalkpleister' en 'A5. Kalkhennep'.

452. Jordan 2022

niet kristallijne, glasachtige component van tufsteen dat tras zijn reactiviteit met kalk te danken heeft⁴⁵³. De zachte tufsteen wordt in open groeven gewonnen met graafmachines. Vervolgens wordt de grove en aardvochtige steen overdekt opgeslagen om gedeeltelijk te drogen aan de lucht. Nadien wordt de massa tufsteen verbrijzeld (zie onderdeel 'A1. Basislaag kalkpleister: productie, hydraulische kalk'), gezeefd en gedroogd in een elektrische droogoven. Ten slotte wordt de tufsteen tot tras fijngemalen in een kogelmolen, en opgeslagen in silo's. De ontwikkeling van moderne maal- en zeeftechnieken heeft ertoe geleid dat tras momenteel zeer fijn gemalen kan worden en zeer zuiver kan worden uitgezeefd. Hoe fijner de puzzolaan wordt vormalen, hoe reactiever de tras wordt⁴⁵⁴. De tras wordt naar verdelers vervoerd in papieren zakken van 40kg of in bulkauto's of transportcontainers⁴⁵⁵.

De milieuimpact van dagbouw in open groeves werd in voorgaande onderdelen al besproken. Het voordeel van tras is echter dat meer dan de helft van het bindmiddel in de kalkpleister B1 wordt vervangen door een geomateriaal dat werd geproduceerd in een relatief energiezuinig proces, waarin haar chemische samenstelling niet werd gewijzigd. Zo kan tufsteen – en tras dus ook – worden gebruikt als bodemverbeteraar en kan het uitgeharde calciumcarbonaat CaCO_3 de pH-waarde van zure gronden verlagen⁴⁵⁶, waardoor de floatcoat na afbraak in principe probleemloos in de natuur kan worden gestort.

Op onderstaande kaart is het transport voorgesteld vanaf de kalkgroeve.



453. Balen en Bommel 2003, p91

454. Verbrijzelde tufsteen kan ook samen met kalk worden gemengd alvorens het vormalen. Daardoor zou een betere menging van beide componenten tot stand komen, die tot betere uitharding zou leiden in de uiteindelijke pleister. 'Traskalk' als product wordt op deze wijze vervaardigd (Balen en Bommel 2003, p92).

455. Thinkstep AG 2019, p3

456. Jordan 2022

Fig.44:
Transport: Trasswerke Meurin tras

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

B2. Scratchcoat kalkpleister, buiten

Algemeen

De floatcoat B1 wordt aangebracht op een scratchcoat, die zoals eerder vermeld als eerste pleisterlaag op de droge kalkhennep wordt gezet, met als bedoeling het grove oppervlak min of meer gelijk te zetten en een goede basis voor de afwerkingspleister te creëren. Daarom wordt de scratchcoat B2 redelijk dik gezet (ongeveer een 20mm), afgestreken met een rijlat, en wordt het nog vochtige oppervlak opgeruwd met een getand mes. Door haar aanzienlijke en ongelijkmatige dikte werd in deze pleister een klein deel vlasvezels gemengd, die werden aangekocht bij Jordan & Co⁴⁵⁷. De vlasvezels zijn uitermate sterk⁴⁵⁸ en de kalkpleister hecht goed aan het vezeloppervlak, waardoor ze als wapening dienen in de pleister. Op deze manier worden spanningen door droogkrimp verdeeld doorheen het materiaal en wordt scheurvorming vermeden. Voor de rest is de samenstelling en verwerking van B2 volledig gelijk aan die van B1, en de eigenschappen van het materiaal bijgevolg ook.

Wegens de gelijkaardige samenstelling wordt in het volgende onderdeel enkel kort ingegaan op de productie van de vlasvezels.

Productie, vlasvezels (zie Fig.49)

In gematigd koele klimaten is vlas is één van de oudste gecultiveerde planten⁴⁵⁹. Het is een snelgroeiend, éénjarig gewas waarvan de teelt lijkt op die van de hennepplant⁴⁶⁰, mede doordat vlas ook behoort tot de familie van bastplanten, gekend voor hun lange en sterke vezels. Vlasteelt vereist weinig tot geen bemesting en pesticiden, en kan op vrijwel alle grondsoorten gebeuren, ook op zwaardere kleigrond of op zand- en veengrond⁴⁶¹. De lange vlasvezels worden gebruikt in de textielindustrie, de vezels die in de kalkpleister worden gemengd zijn korte vezels van mindere kwaliteit. Bij het verbouwen van de vlasplant wordt in alle fases gebruik gemaakt van landbouw- en transportvoertuigen die werken op [diesel](#). Bij de latere verwerking werken de meeste machines op [elektriciteit](#).

In het algemeen wordt de teeltaarde 'ondiep en fijn' bewerkt tijdens het voorjaar, waarbij het doel is een gelijkmatig zaaibed aan te leggen waarin op regelmatige diepte gezaaid kan worden. Vlas wordt idealiter machinaal gezaaid in de periode maart – begin april, waarbij een korte afstand tussen de zaairijen wordt gehanteerd (max. 10cm). Bemesting is op de meeste gronden niet nodig, in het andere geval worden meestal stikstof, fosfaat of kalium gebruikt⁴⁶².

Met een gemiddelde teeltduur van 100 dagen is het vlas vrij snel volgroeid en klaar om geplukt te worden. Er bestaan verschillende gemechaniseerde methodes om vlas te oogsten⁴⁶³. In essentie wordt de vlasplant in zijn geheel aan de stengel uit de grond getrokken door een vlasoogst- of 'trekrepelmaschine', wat moet gebeuren in droge omstandigheden. Bij dit 'trekken' worden de zaadbollen gelijktijdig machinaal van het vlas gescheiden. Het vlasstro wordt door de oogstmachine meteen in zwaden op het veld neergelegd

Scratchcoat, buiten

L x H x B [mm]	nvtxnvtx20
ρ^* [kg/m ³]	~ 1400
Treksterkte [N/mm ²]	nvt
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ^{**} [W/mK]	~ 0,3
c^{**} [J/kgK]	~ 1000

* Gewicht van de natte pleister.

** Waarde bij ontstentenis, gebaseerd op A1: Basislaag kalkpleister.

457. Informatie over de producent is niet beschikbaar.

458. Vlasvezels zijn tweemaal sterker dan polyestervezels, en 50 – 75% sterker dan katoenvezels. Bovendien neemt de sterkte van vlas toe wanneer het nat is (Berge 2009, p158).

459. Berge 2009, p158

460. Zie onderdeel 'A5. Kalkhennep'.

461. Vreeke 1991, p14

462. Ibid., pp 15-21

463. Zo beschrijft Vreeke (1991) de volgende technieken: de traditionele oogst, het trekken/dauwroten, het keerrepelen, het trekrepelen en het opraapdorsen met maaidorser (Vreeke 1991, pp 39,40).

om te dauwroten. Net zoals bij de hennepsteelt heeft het dauwroten als doel het nadien eenvoudiger te maken om de vlasstengels in verschillende producten te scheiden. De dauw en het grondvocht zorgen ervoor dat de pectines in de plant oplossen zodat de vezels loskomen⁴⁶⁴. Dauwroten vereist geen energie en is milieuvriendelijk, maar niet zonder risico op rotting, daarom wordt het vlas regelmatig gecontroleerd en gekeerd. Na het roten wordt het vlas gedroogd en nadien op balen geperst en gestockeerd. Later worden de balen ontroid en wordt het gerote vlas ‘gebraakt’ en ‘gezwingeld’. In deze processen wordt het stengelhout van de vezels gescheiden⁴⁶⁵. In het laatste proces, het ‘hekelen’, worden de vlasvezels machinaal ‘gekamd’ en gesplitst in lange en korte vezels, en worden de vezelige kern en onzuiverheden verwijderd.

Uit de vlasplant worden bijzonder ‘sterke en duurzame’ vezels geproduceerd⁴⁶⁶. Daarbij zijn de korte vezels in feite een restproduct en een hernieuwbaar bouw materiaal, en capteert vlas zoals elke plant CO₂ door fotosynthese tijdens haar groei. Indien geen meststoffen of pesticiden worden gebruikt, heeft de vlasteelt een bijzonder lage milieupact.

464. Wavalin NV z.d.
465. De stukken stengelhout of ‘scheven’ zijn geschikt voor toepassingen in isolatiemateriaal, stalstrooisel,... Bij het zuiveren van de scheven komt nog een deel van de korte vlasvezels vrij (Wavalin NV z.d.).
466. Ashby 2013, p185

B3. Houtskelet

Op onderstaande kaart is het transport voorgesteld vanaf Scandinavië.

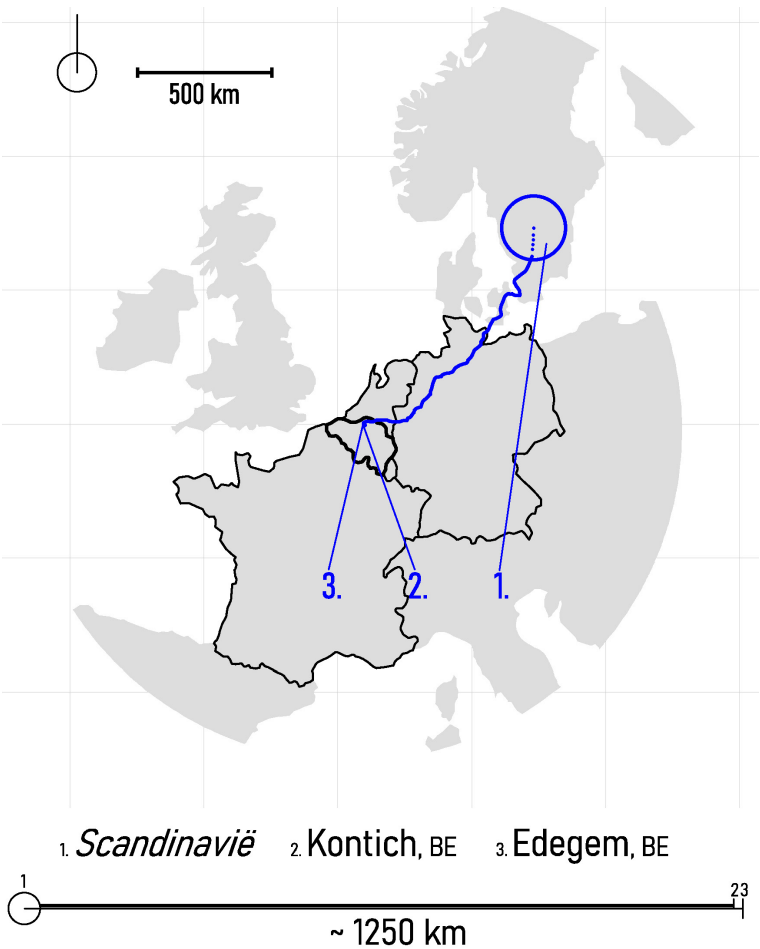


Fig.45:
Transport: Trasswerke Meurin tras

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

SLS geïmpregneerd*	
L x H x B [mm]	nvtx38x140
ρ** [kg/m3]	450
Treksterkte [N/mm2]	60
Druksterkte [N/mm2]	45
λ*** [W/mK]	~ 0,25
c*** [J/kgK]	~ 1700

* Alle waarden werden bekomen uit (Belgian Woodforum 2022).
** Bij vochtgehalte van 15%.
*** Waarde uit (Ashby 2013)

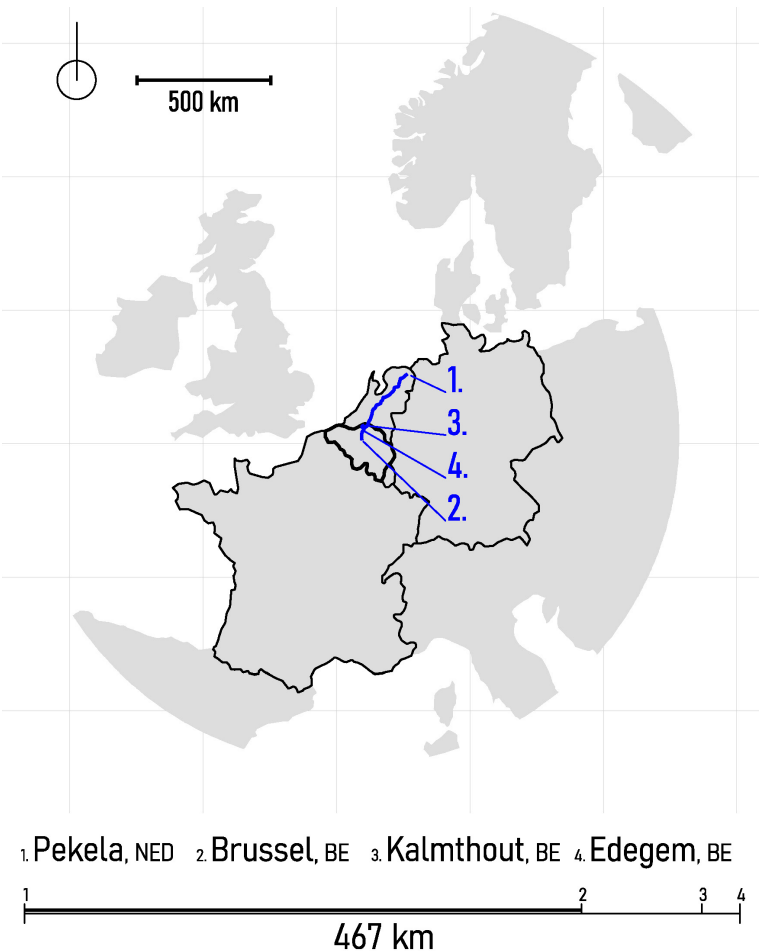
Het houtskelet in wand B – of beter; de houtstijlen – heeft een dubbele functie. Enerzijds verleent het stevigheid aan de uitgeharde kalkhennep⁴⁶⁷, anderzijds waren de stijlen noodzakelijke bevestigingspunten om de opschuivende bekisting tijdens het storten van de kalkhennep aan vast te maken. Het skelet bestaat uit geïmpregneerde SLS-balken, wat geschaafde en gekalibreerde vuren balken met afgeschuinde hoeken zijn, met afmetingen 38 x 140mm. De balken werden aangekocht bij Martens Hout, in Kontich⁴⁶⁸.

De eigenschappen van SLS, de teelt van de fijnspar en de verwerking tot constructiehout werden al besproken in onderdeel ‘A6. Houtskelet’.

B4. Kalkhennep

In essentie is de kalkhennep B4 volledig gelijk aan de kalkhennep A5: een mengeling van water, hydraatkalk, hennepscheven en een additief. Voor de eigenschappen van de kalkhennep en de productieprocessen van de samenstellende delen wordt dan ook verwezen naar onderdeel ‘A5: Kalkhennep’.

Op onderstaande kaart is het transport van de hennepscheven voorgesteld vanaf de productiesite van Hempflax.



467. De kalkhennep wordt niet gedragen door de stijlen, maar steunt op het houten dak (zie fig 42). De horizontale stabiliteit van de voorzetwand en haar hechting aan de baksteenmuur wordt echter voor het grootste deel door het houtskelet verzekerd.

468. Informatie over de producent is niet beschikbaar.

Kalkhennep*	
L x H x B [mm]	nvtxnvtx300
ρ [kg/m3]	~ 175
Treksterkte [N/mm2]	nvt
Druksterkte [N/mm2]	nvt
λ [W/mK]	0,054
c** [J/kgK]	1000-2900

* Waarden bij ontstentenis, gebaseerd op (EXIE NV, z.d.).

** Waarde uit (Shang en Tariku 2021)

Fig.46:
Transport: Hennepscheven

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

Waar deze kalkhennep in verschilt is het feit dat ze door de eigenaars zelf werd samengesteld op de werf. De gebruikte hoeveelheden lagen aldus niet vast en waren mede afhankelijk van de vochtigheid van de dagen voordien en de temperatuur op het moment zelf, aangezien de samenstellende delen werden gemengd met water tot een mengsel met 'een werkbare consistentie'⁴⁶⁹. De samenstelling die in wand B werd gebruikt bestond uit 2 delen hydraatkalk, 2 delen water, 7 delen hennep en 0,2 delen additief. Alle grondstoffen werden geleverd door Jordan & Co. De hennepscheven werden geproduceerd door het Nederlandse bedrijf Hempflax, gelegen in Pekela. De hydraatkalk is van het type SuperCalco® 97⁴⁷⁰.

Het additief voor de kalkhennep is **Hempad 4+**, geproduceerd door Jordan & Co. Er is geen informatie beschikbaar over wat de samenstelling van dit product juist is, aangezien dit vertrouwelijke informatie is binnen het bedrijf. Er is enkel geweten dat het gebaseerd is op tras⁴⁷¹, en daarmee als natuurlijk puzzolaan⁴⁷² de kalk licht hydraulisch maakt⁴⁷³.

B5. Scratchcoat kalkpleister, binnen

Ook langs de binnenkant is de scratchcoat de eerste pleisterlaag die op de bakstenen ondergrond werd gezet, in een dikte van ongeveer 15mm. De werkwijze was volledig gelijkaardig aan die van de scratchcoat B2. De samenstelling van deze pleister verschilt echter wel. Niet enkel werden er meer vlasvezels in het pleistermengsel toegevoegd, de hoeveelheid tras uit de buitenste scratchcoat werd aan de binnenkant niet gebruikt maar volledig vervangen door extra hydraatkalk SuperCalco® 97. Hydraulische eigenschappen – of het niet meer reactief zijn met water na verharding – zijn voor een kalkpleister die binnen wordt toegepast immers niet vereist. Vermoedelijk dient de extra hoeveelheid vlasvezels om weerstand te bieden aan de effecten van de droogkrimp, die toenemen doordat het verhardingsmechanisme bestaat uit een zuivere carbonatiereactie⁴⁷⁴. Dit leverde een mengsel op van 2 delen hydraatkalk, 4 delen 0/2 rijnzand, 0,5 delen vlasvezels en iets meer dan 2 delen water.

De eigenschappen van de scratchcoat en de productieprocessen van de samenstellende delen werden al besproken in onderdeel 'B2. Scratchcoat kalkpleister, buiten'. Een overzicht van deze laag wordt gegeven in Fig.50 .

469. Everaerts 2022

470. Zie onderdeel 'B1. Floatcoat kalkpleister, buiten'.

471. Jordan 2022

472. Zie onderdeel 'B1. Floatcoat kalkpleister, buiten'.

473. Wegens de kleine hoeveelheid additief tegen de hoeveelheid hydraatkalk, zal de graad van hydrauliteit beperkt zijn gebleven in het mengsel. Het additief 'bestaat uit 100% natuurlijke materialen. [Het] verbetert [het] kleeftvermogen en versnelt het begin van droging. [Het] laat toe om met een schuifbekisting continu door te werken. Ook het isolatievermogen van de kalkhennep blijkt hiermee te verbeteren' (Jordan & Co z.d.).

Scratchcoat, binnen

L x H x B [mm]	nvtxnvtx15
ρ^* [kg/m ³]	~ 1050
Treksterkte [N/mm ²]	nvt
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ^{**} [W/mK]	~ 0,3
c^{**} [J/kgK]	~ 1000

* Gewicht van de natte pleister.

** Waarde bij ontstentenis, gebaseerd op A1: Basislaag kalkpleister.

474. Een andere verklaring zou zijn dat het binnenoppervlak van de oude baksteenmuur veel ongelijkmatiger was dan de bekiste kalkhennep. Het pleisteren van een dergelijk oppervlak levert logischerwijs een pleisterlaag op met een sterk variërende dikte, wat bijdraagt aan scheurvorming bij het drogen.

475. Zie onderdeel 'A5. Kalkhennep: productie, hydraatkalk'.

B6. Floatcoat kalkpleister, binnen

Ook de aan de binnenkant aangebrachte floatcoat – die met een dikte van 5mm de uitvullingslaag is van de scratchcoat – is op een zelfde manier gelijkend en verschillend aan de floatcoat B1. Ook aan deze pleister werd geen tras toegevoegd omdat een hydraulische reactie niet gewenst was. Deze floatcoat bestond alsdus eenvoudigweg uit 2 delen SuperCalco® 97 hydraatkalk, 4 delen 0/2 rijnzand en iets meer dan 2 delen water.

De eigenschappen van de floatcoat en de productieprocessen van de samenstellende delen werden al besproken in onderdeel 'B1. Floatcoat kalkpleister, buiten'. Een overzicht van deze laag wordt gegeven in Fig.51.

B7. Finishing coat kalkpleister, binnen

Zoals eerder beschreven dient de finishing coat om het binnenoppervlak op een zeer egale en fijne manier af te werken. Om deze fijne textuur te bekomen werd een pleistermengsel samengesteld met 1 deel SuperCalco® 97 hydraatkalk op 1,25 delen Lommelzand, wat werd gemengd met een klein deel water. Door de finishing coat in 2 lagen van ongeveer 5mm dik te zetten (nat-in-nat), werd het risico op droogscheuren verkleind en kon de laatste deellaag worden nat gesponst en glad worden afgestreken.

Het Lommelzand in de finishing coat is een gezuiverd lichtgrijs kwartsrijk zand afkomstig uit Lommel met een fijne korrelgrootteverdeling (0 – 1mm). Het zand werd aangekocht bij BMB Bouwmaterialen in Kalmthout in zakken van 25kg en werd ontgonnen in (de omgeving van) Lommel. Hoewel dit in een open groeve gebeurt, lijkt het ontginnings- en verwerkingsproces sterk op dat van rivierzand, aangezien het zand wordt ontgonnen onder het grondwaterniveau. Hiervoor wordt verwezen naar onderdeel 'A1. Basislaag kalkpleister: productie, kwartzand'⁴⁷⁶. De milieuimpact van dagbouw werd eveneens al beschreven in onderdeel 'A1. Basislaag kalkpleister'. In principe wordt de impact van deze zandontginning echter beperkt tot de mijnsite, aangezien niet wordt geraakt aan het grondwaterniveau en het afvalwater van de verwerking wordt gezuiverd alvorens het wordt afgevoerd⁴⁷⁷. Verder is het productieproces relatief energiezuinig en blijft het geraffineerde Lommelzand een geomateriaal.

Op onderstaande kaart is het transport van het Lommelzand voorgesteld vanaf de zandgroeve in Lommel.

Floatcoat, binnen

L x H x B [mm]	nvt x nvt x 5
ρ^* [kg/m ³]	~ 1100
Treksterkte [N/mm ²]	nvt
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ^{**} [W/mK]	~ 0,3
c^{**} [J/kgK]	~ 1000

* Gewicht van de natte pleister.

** Waarde bij ontstentenis, gebaseerd op A1: Basislaag kalkpleister.

Finishing coat, binnen

L x H x B [mm]	nvt x nvt x 10
ρ^* [kg/m ³]	~ 1100
Treksterkte [N/mm ²]	nvt
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ^{**} [W/mK]	~ 0,3
c^{**} [J/kgK]	~ 1000

* Gewicht van de natte pleister.

** Waarde bij ontstentenis, gebaseerd op A1: Basislaag kalkpleister.

476. Een overzicht van de productie wordt gegeven in Fig.52.

477. Videotech 1994

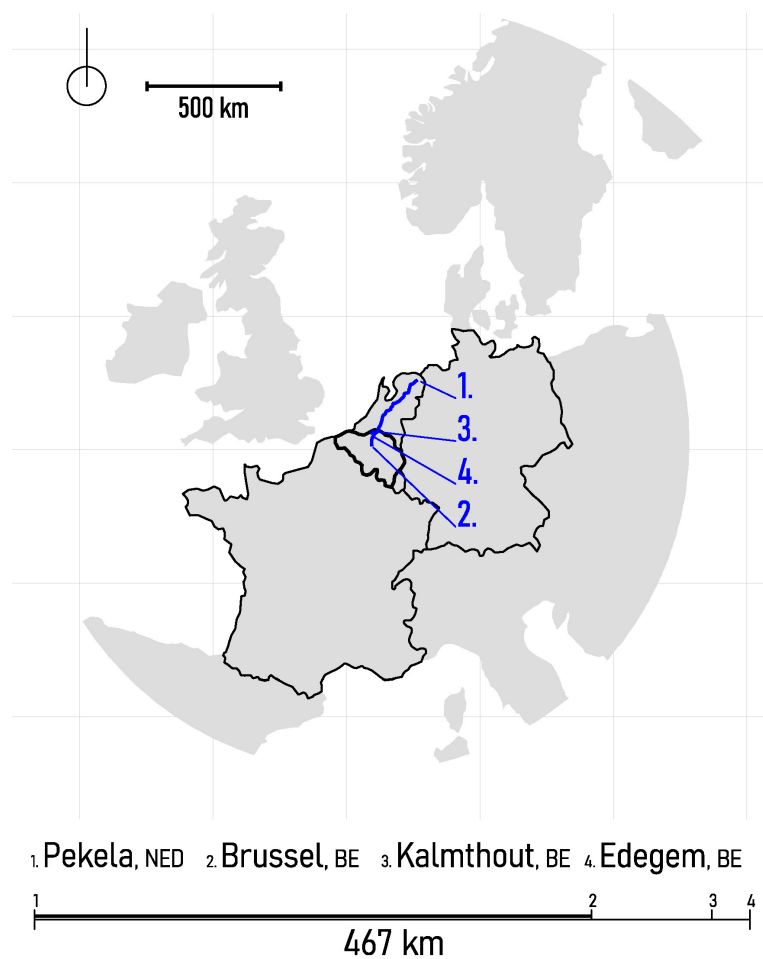


Fig.47:

Transport: Lommelzand

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

Fig.48:
B1. Floatcoat kalkpleister, buiten
Flowchart productie

Percentages worden uitgedrukt in volumedelen van de aangebrachte pleister.

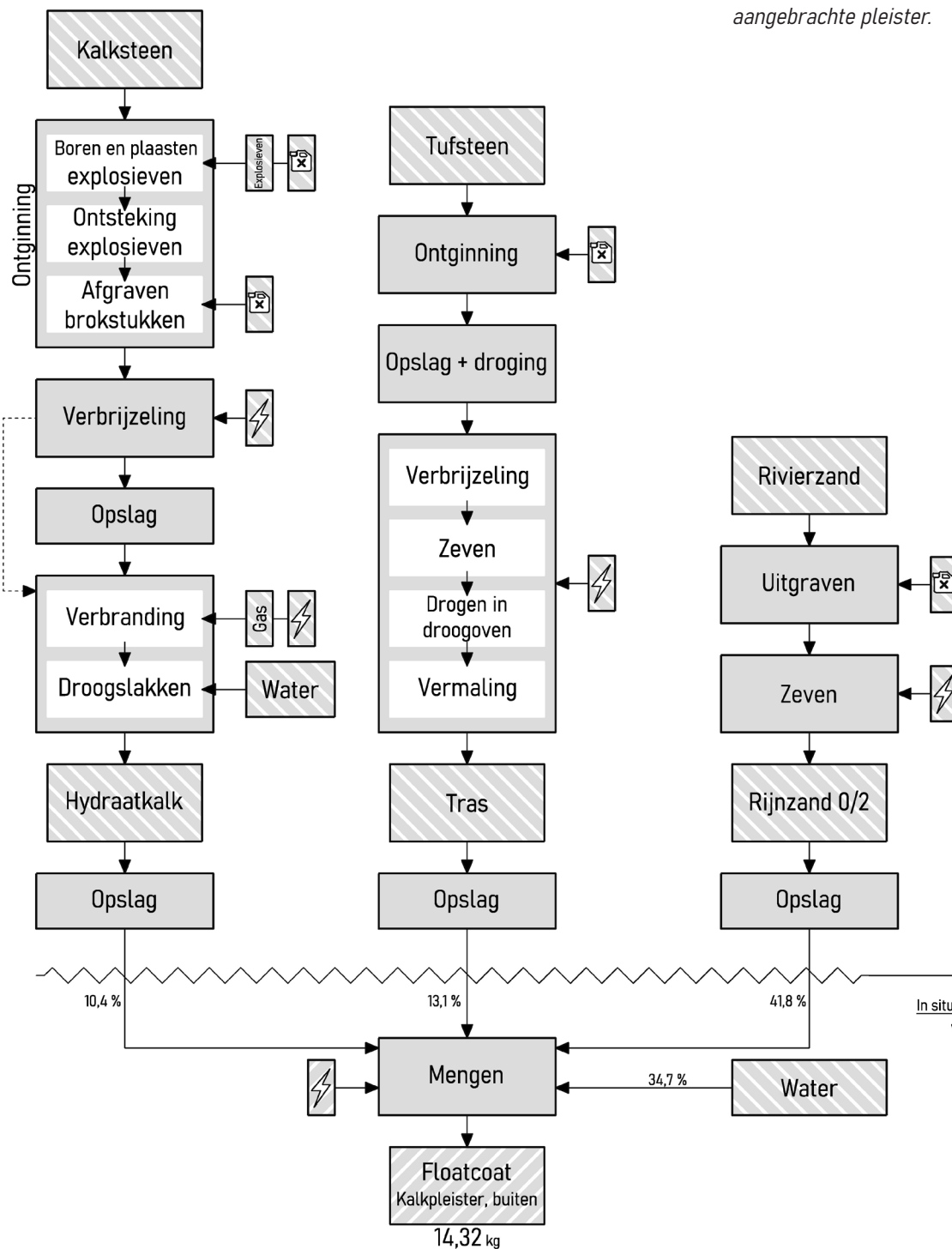


Fig.49:
B2. Scratchcoat kalk-
pleister, buiten
Flowchart productie

Percentages worden uitge-
drukt in volumedelen van de
aangebrachte pleister.

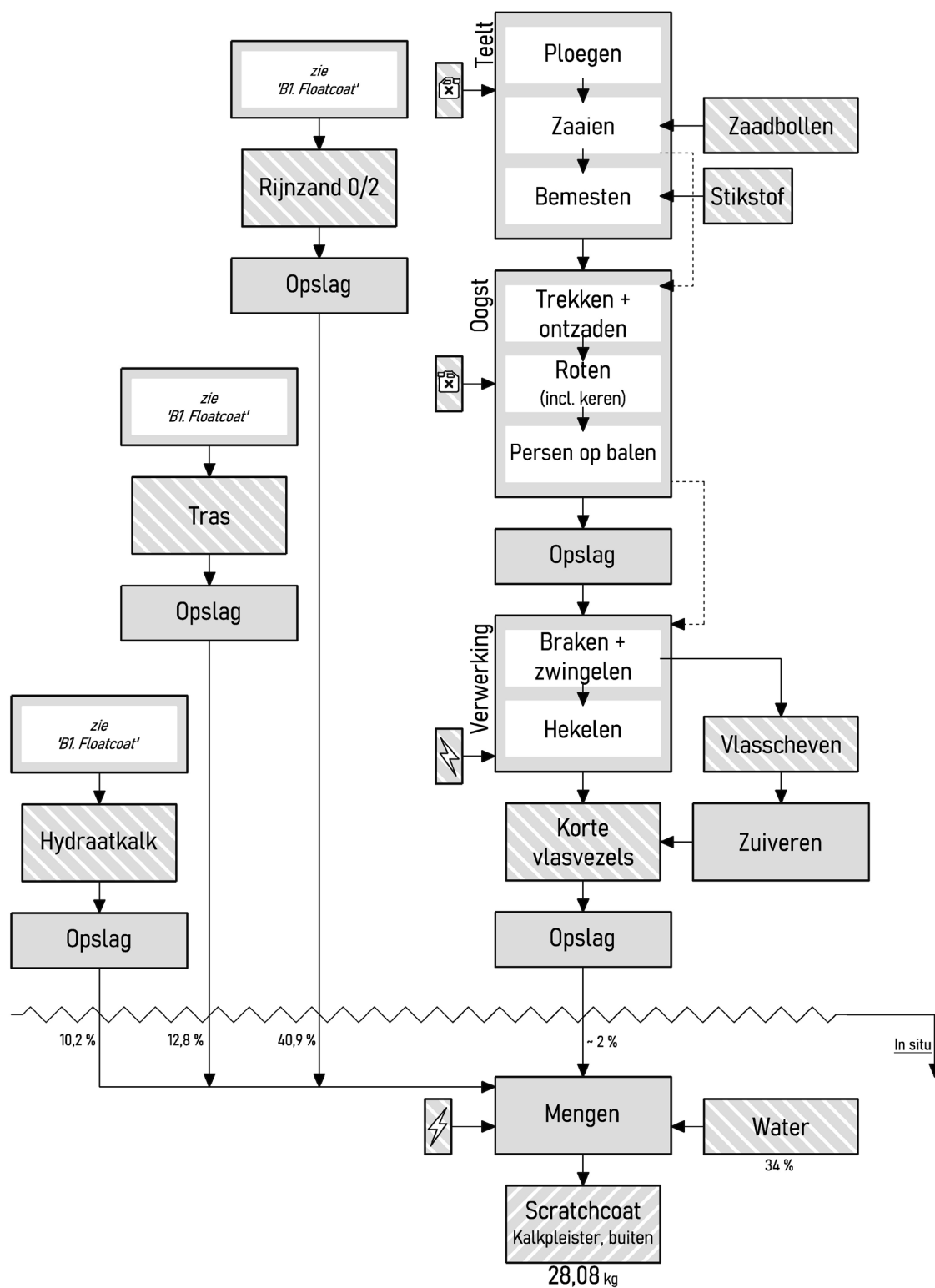
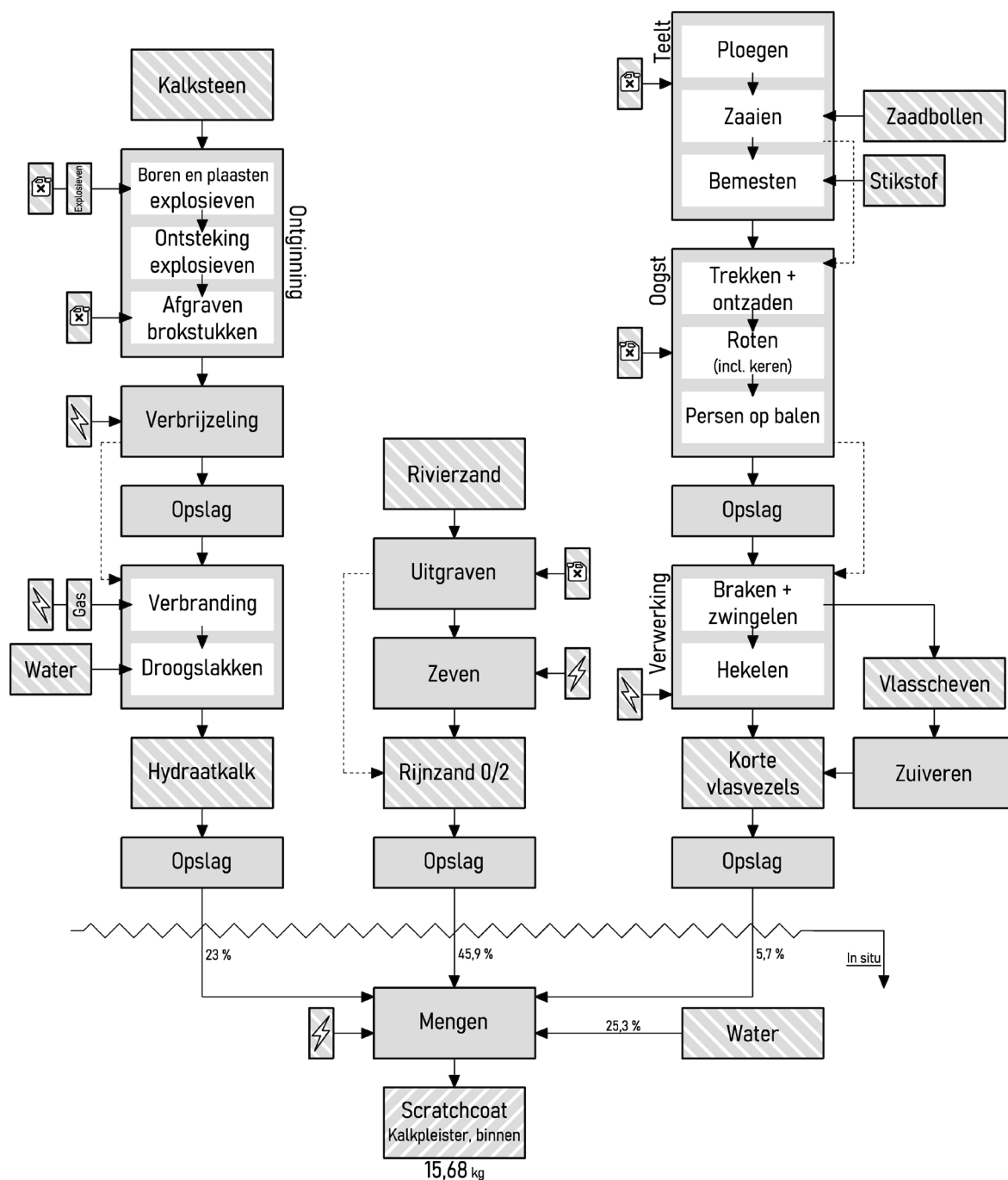


Fig.50:
B5. Scratchcoat kalk-
pleister, binnen
Flowchart productie

Percentages worden uitge-
drukt in volumedelen van de
aangebrachte pleister.



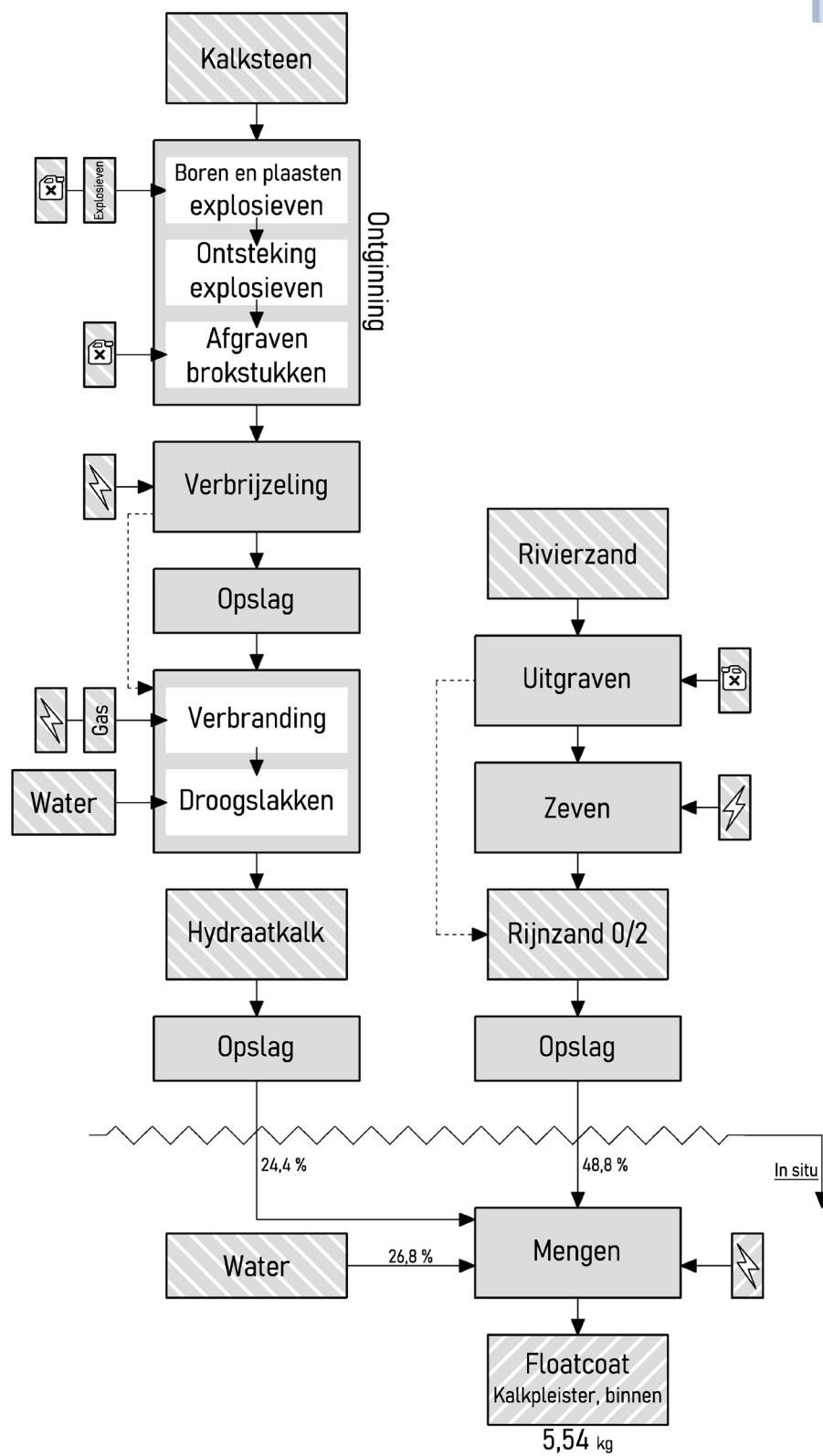
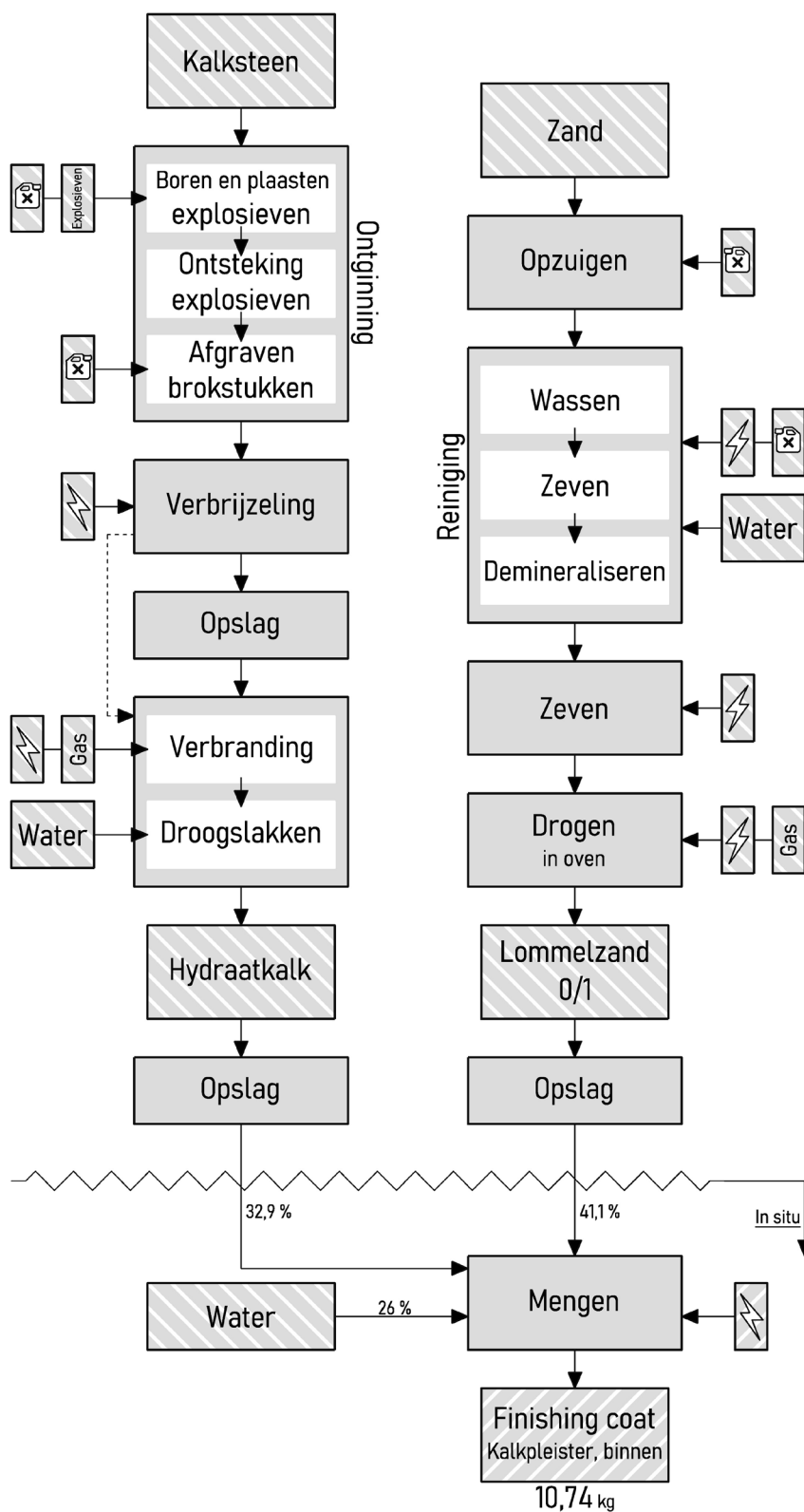


Fig.51:
B6. Floatcoat
kalkpleister, binnen
Flowchart productie

Percentages worden uitgedrukt in volumedelen van de aangebrachte pleister.

Fig.52:
B7. Finishing coat
kalkpleister, binnen
Flowchart productie

Percentages worden uitgedrukt in volumedelen van de aangebrachte pleister.



Wand C: Stroleem in renovatie, Temse

Wand C is een deel van de buitenmuur van een vrijstaande woning in Temse met één verdieping⁴³⁷ (zie Fig.53). De woning was oorspronkelijk een bakstenen schuur die in 1997 grondig werd gerenoveerd. Zo werd het dak vervangen, en waar de leefruimtes kwamen werd het grootste deel van de binnenmuren afgebroken en verplaatst. Verder werd ongeveer 2/3 van de bakstenen buitenmuur vervangen door een nieuwe stroleem-houtskeletwand⁴⁷⁹. Deze wand werd aangezet op een stuk bakstenen spouwmuur, ongeveer 60cm in hoogte, waarvan het buitenspouwblad uit gerecupereerde gevelstenen bestaat (zie Fig. 60). De draagstructuur van de stroleemwand bestaat uit een ontdubbeld houtskelet, dat tevens de dakplaat draagt. Het houtskelet zit ingebed in een 30cm dikke laag stroleem. De wand is langs buiten bezet met een kalkcementpleister en langs de binnenkant met een leempleister. Beiden zijn aangebracht op een onderlaag.

Ter verduidelijking van de opbouw wordt verwezen naar Fig. 59 . Een detail van de muurvoet (aansluiting op de oorspronkelijke bakstenen strookfundering) is getekend in Fig. 60 .

Nadat de muurvoet was opgemetseld werd de onderregel van het houtskelet verankerd in de ter plaatse gestorte betonnen ringbalk. Op deze regel werden vervolgens de dubbele stijlen gemonteerd (C4), met een h.o.h. afstand van 65cm. Op plaatsen waar de vloerbalken worden afgedragen werd een zwaardere stijl voorzien in plaats van de 2 kleine secties (zie Fig.55). Nadat het muurskelet volledig⁴⁸⁰ was geplaatst werd overgaan tot het opbouwen van de eigenlijke wand met stroleem (C3), wat gebeurde in de lente en zomer van 1997⁴⁸¹. Dit geschiedde op een gelijkaardige manier als bij wand B⁴⁸², met een schuifbekisting. In dit geval werd er gebruik gemaakt van 50cm hoge betonplex en 6cm dikke panlatten als afstandshouders (zie Fig.57). Nadat de stroleem met emmers in de bekisting was gestort en licht was aangedamd⁴⁸³, konden de platen door de hoge temperaturen en het droge weer na enkele uren al, en niet langer, worden losgemaakt⁴⁸⁴. Ook hier werden de gaten in de nog vochtige stroleem opgevuld met extra materiaal. De muuropeningen voor latere ramen en deuren werden bekist met houtwolcementplaten van Heraklith. Deze methode leverde een wand op met een zeer ruw stroleem oppervlak. Alvorens de wand kon worden bepleisterd, was het belangrijk dat de stroleem goed droog was⁴⁸⁵. Doordat het drogen enkele weken duurde begon er na verloop van tijd gras te groeien op de wand (zie Fig.58). Dit versnelde echter het droogproces en het gras stierf eenvoudigweg af wanneer de wand droog genoeg was om te kunnen bepleisteren. Eerst werd de binnenkant⁴⁸⁶ afgewerkt met een leempleister (C5) (zie Fig.56), die nog vooraf werd gegaan door een 'leemputz' (C2) te zetten op de stroleem⁴⁸⁷. Als laatste stap werd de wand langs buiten afgewerkt met een leemputz en daarop een cementkalkpleister (C1) die in 2 lagen werd aangebracht (zie Fig.54).

Woning C is tot stand gekomen door een mix van professionele arbeid en zelfbouw. Doorheen het hele proces werden de eigenaars bijgestaan door een architect die gespecialiseerd was in leembouw⁴⁸⁸. Zowel de gemetste muren, het houtskelet en dakstructuur, en de binnen- en buitenpleisters

478. De contactpersonen, zelfbouwers en eigenaars van de woning, zijn Frank Maes en Carla Verhulst.

479. Zo is niet de hele buitenwand opgebouwd uit een houtskelet met stroleem-invulling. De buitenmuur werd echter wel overal afgewerkt met dezelfde pleister.

480. Het houtskelet in de muur reikt tot aan de dakplaat. Ook de hoofdbalken van de verdiepingvloer waren al geplaatst wanneer aan het lemen werd begonnen, wat dit op die plaatsen bemoeilijkt.

481. Het plaatsen van de stroleem werd aangevangen begin mei 1997 (Maes en Verhulst 2022).

482. Zie onderdeel 'Wand B: beschrijving'.

483. Met een handstamper/houten stok.

484. De platen werden voorzichtig losgemaakt, door ze van de stroleem te 'schuiven'. Door de cohesie van de natte leem bestond er ander het risico dat het vochtige materiaal zou worden meegetrokken. Ook mocht er niet langer dan een halve dag worden gewacht aangezien er dan ook het risico bestond dat opgedroogde stroleem aan de plaat zou blijven plakken. De andere reden om de platen zo snel mogelijk los te maken was dat de wand zo snel mogelijk moest uitdrogen, om schimmelvorming te vermijden (Maes en Verhulst 2022).

485. Hoewel een snelle droging belangrijk was, is het opmerkelijk dat enkel de bovenkant van de wand werd afgedekt tegen de regen.

486. De binnen- en buitenpleister konden niet gelijktijdig worden aangebracht omdat de muur zo lang mogelijk moest kunnen uitdrogen naar buiten toe (Maes en Verhulst 2022).

487. Ardui e.a. 1996, p103

werden door de aannemer en pleisterwerker gezet. De arbeidsintensieve stroleemopvulling werd echter door de 2 eigenaars zelf geplaatst, met hulp van 'familieleden en verschillende vrienden'⁴⁸⁹. Precieze instructies waren er noch voor de stroleemsamenstelling, noch voor de manier van werken. In een oude badkuip, tot de helft gevuld met water, werd leemgrond, aangevoerd met een vrachtwagen, gemengd met losgetrokken strobalen, tot een consistentie van 'een dikke pap' werd bekomen⁴⁹⁰. Dit werd in de namiddag gedaan, na het opvullen van de wanden, zodat het mengsel een hele nacht kon 'trekken' op een hoop (zie Fig.55). Doordat het stro tijdens de nacht zacht en werkbaar werd kon het mengsel de volgende dag worden gebruikt in de wand. Zeker in het begin nam het vullen van het houtskelet veel tijd in beslag. Zo kostte enkel het met stroleem opvullen van de eerste wand ongeveer 2,5 manuren/ m² of 150 min/ m² ⁴⁹¹.

Wand C is mede door haar leeftijd een interessant studieobject⁴⁹². De wand verkeert algemeen nog steeds in een zeer goede staat, en dit terwijl er nog geen enkele keer aan onderhoud werd gedaan. Enkel wanneer er slagregen op de gevel inslaat ontstaan er vochtplekken aan de binnenkant, ter hoogte van enkele ramen en deuren⁴⁹³. Ook zitten er op bepaalde plaatsen in de buitenpleister scheuren. Beide fenomenen blijven naar oordeel van de eigenaars echter oppervlakkig en berokkenen geen ernstige schade aan de wand.

488. Stefaan Ardui (niet meer actief als architect).

489. Maes en Verhulst 2022

490. Ibid.

491. Voor deze schatting werd aangenomen dat er per dag 4 uur kon worden gespendeerd aan het effectief vullen van de wand. De besproken wand heeft een opake oppervlakte van 13,8 m². De 2 eigenaars hebben samen een volledige werkweek (5 dagen) besteed aan dit werk.

492. Op het moment dat deze scriptie wordt afgerond, midden 2022, is wand C bijna exact 25 jaar oud.

493. Deze plekken drogen echter steeds weer uit wanneer de buitenkant van de muur lang genoeg droog blijft (Maes en Verhulst 2022).



Fig.53:
Wand C: context

Wand C maakt deel uit van de buitenmuur van een vrijstaande woning in Temse.

De woning was oorspronkelijk een bakstenen schuur die werd gerenoveerd in 1997.



Fig.54:
Wand C: detail afwerking, buiten

Op de foto is de buitenafwerking met een kalkcementpleister te zien.



Fig.55:
Wand C: constructie

In de achtergrond is het houtskelet zichtbaar, met houtwolcementplaten als bekisting ter plekke van de muuropeningen.

In de voorgrond is één van de eigenaars bezig met het manueel drenken van de stro in een leembad.



Fig.56:
Wand C: constructie

Deze foto laat de bijna afgewerkte stroleemopvulling zien.



Fig.57:
Wand C: schuifbekisting



Fig.58:
Wand C: uitdrogen van de wand

Door het resterende vocht in de stroleem groeide er na enige tijd gras op de muren, wat er weer afviel toen de muren waren uitgedroogd. De vochtvlekken zijn te wijten aan neerslag.

Fig. 59:

Wand C type m2

buiten

1. Kalkcementpleister	15mm
2. Leemputz	10mm
3. Stroleem	300mm
4. Wandstijl	60mm
4. Wandstijl	60mm
2. Leemputz	10mm
5. Leempleister	25mm

binnen

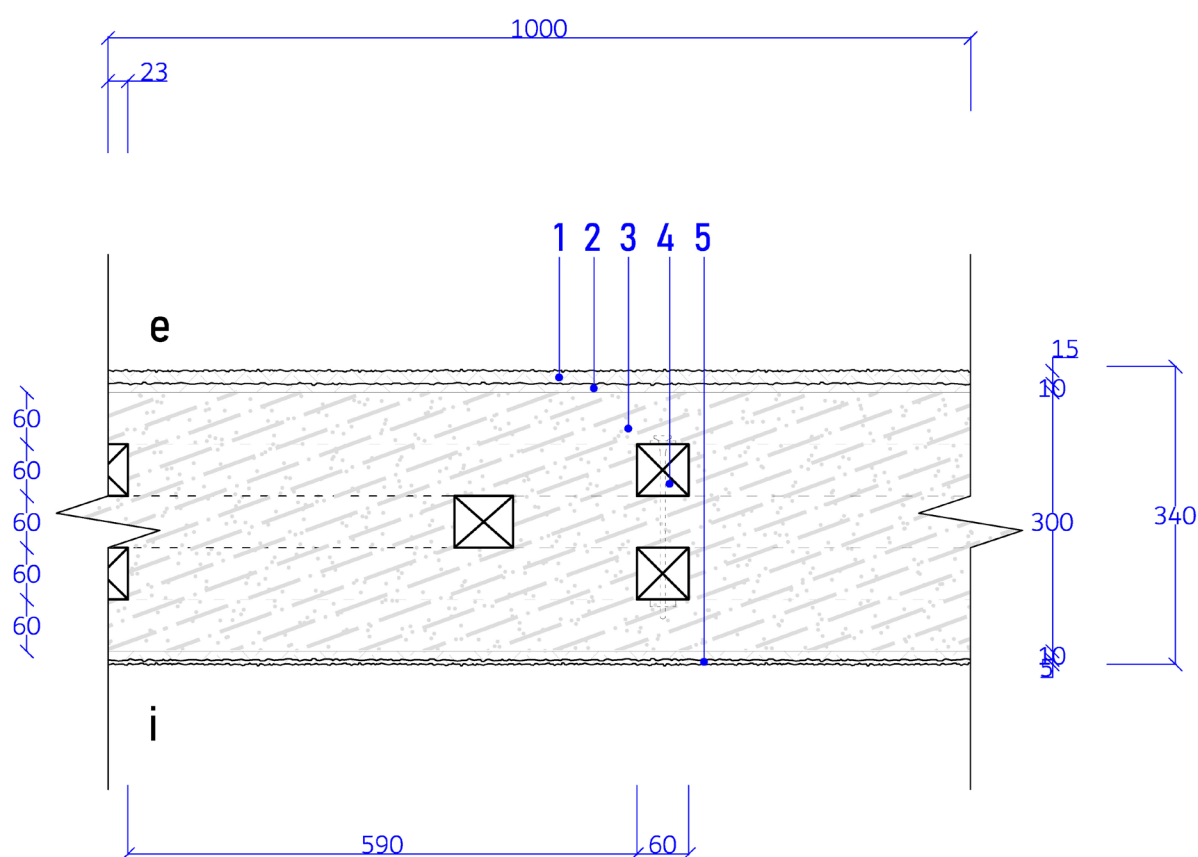


Fig. 60:

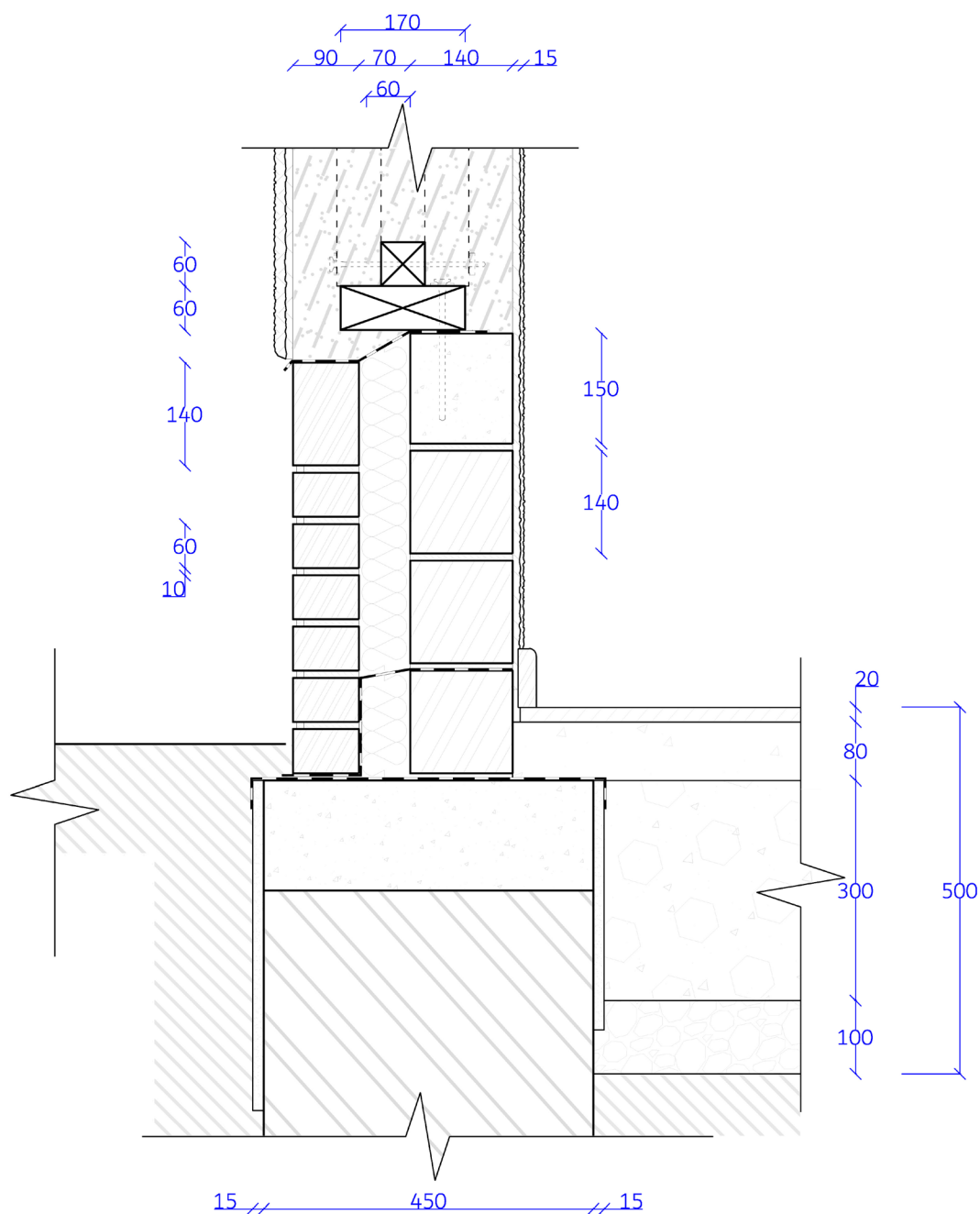
Wand C muurvoet

Vloeropbouw

binnen

Tegel	20mm
Kalkchape	80mm
ARGEX Thermovloer	300mm
Kiezel 20/30	100mm

bodem



C1. Kalkcementpleister

Algemeen

De buitenste laag van wand C bestaat uit een ongeveer 15mm dikke kalkcementpleister. Deze pleister werd gezet in 2 lagen: een eerste dunne 'raaplaag' om de gaten in de uitgeharde leemputz te vullen⁴⁹⁴, en een volgende dunne laag als eindafwerking. Het pleisteren werd gedaan door pleisterwerker Jan Vloemans, uit Ravels, die tevens de pleister zelf in situ samenstelde.

De kalkcementpleister heeft een relatief complexe samenstelling. Ze bestaat uit 1 deel wit cement, 2 delen hydraatkalk en 8 delen rijnzand van gemengde korrelverdeling (0 – 5mm). Verder werden er ook nog delen vlas en verhakseld stro in gemengd, al zijn de hoeveelheden hiervan niet gekend. De vochtige pleister werd aangemaakt door de droge samenstelling te mengen met ongeveer 3 delen 'leemwater'⁴⁹⁵. De herkomst van de samenstellende delen is niet gekend⁴⁹⁶. Het deel cement gaf de pleister (licht) hydraulische eigenschappen, wat de verklaring is voor de goede staat waarin ze momenteel verkeert. Door de combinatie van wit cement, leemwater en het redelijke grove rivierzand werd de lichtbeige en korrelige textuur bekomen (zie Fig.54).

De productie- en verwerkingsprocessen van de hydraatkalk, het rivierzand, de vlasvezels en de leemaarde werden hiervoor al besproken. Voor het productieproces van stro wordt verwezen naar onderdeel 'C3. Stroleem'. In het volgende onderdeel aldus enkel ingegaan op de productie van het wit cement.

Productie, wit cement (zie Fig.63)

Het wit cement is de hydraulische component in de kalkcementpleister C1, waardoor deze snel uithardt tot een relatief hoge sterkte. Wit cement is zeer gelijkaardig aan het normale Portlandcement, behalve wat betreft haar kleur. Om die reden worden bepaalde andere grondstoffen gebruikt en wordt het productieproces in bepaalde fases substantieel gewijzigd, wat van wit cement een iets duurder product maakt⁴⁹⁷. Het productieproces berust op gemechaniseerde extractie en transport (vrachtwagens en bulldozers) (**diesel**), **elektriciteit** voor de bewerking van de grondstoffen en verwerking van de klinker, **aardgas** en **-olie** als mogelijke brandstoffen voor de calcinatie, en **water** voor het afkoelen van de klinker.

De belangrijkste hydraulisch reactieve componenten in cementklinker zijn tricalciumsilicaat (C3S) en tricalciumaliminaat (C3A), die sneller reageren met water dan dicalciumsilicaat in hydraulische kalk⁴⁹⁸. De grondstoffen die aan de basis liggen van cement moeten de voornaamste oxyden bevatten die tussenkomen bij de chemische samenstelling van de klinker. De voornaamste grondstoffen zijn zeer zuivere **kalksteen**, **kaolien**⁴⁹⁹, puur **kwartszand** en **gips**. De grondstoffen worden uit groeven opgedolven waarbij, naargelang de hardheid van het gesteente, gebruik gemaakt wordt van baggerinstallaties (zachte materialen) of mechanische schoppen en explosieven (harde materialen)⁵⁰⁰. In de 'droge methode'⁵⁰¹ worden

Kalkcementpleister

L x H x B [mm]	nvtxnvtx15
ρ^* [kg/m ³]	~ 1150
Treksterkte [N/mm ²]	nvt
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ^{**} [W/mK]	~ 0,3
c^{**} [J/kgK]	~ 1000

* Gewicht van de natte pleister.

** Waarde bij ontstentenis, gebaseerd op A1: Basislaag kalkpleister.

494. Zie onderdeel 'C2. Leemputz'.

495. In de mengkuip werd op voorhand een fractie leemaarde gemengd met zuiver water (Maes en Verhulst 2022). Oftewel was deze leemaarde een pure grondsoort die voornamelijk bestaat uit siltdeeltjes, ofwel was er sprake van een kunstmatig samengesteld materiaal.

496. Enkel de herkomst van het verhakseld stro, dat allicht hetzelfde was als wat werd gebruikt in de stroleem, is geweten (zie onderdeel 'C3. Stroleem').

497. AGICO Cement 2022

498. Balen en Bommel 2003, p18

499. Kaolien is een zeer zuiver en wit kleimineraal dat bestaat uit het aluminium-fylosilicaat kaolinet, en wordt in wit cement gebruikt ter vervanging van klei, wat ijzeroxide (Fe₂O₃) bevat dat een grijze kleur veroorzaakt (AGICO Cement 2022).

500. Taerwe 2006, p3.5

501. Er bestaat ook een 'natte methode', waarin de zachte grondstoffen in suspensie worden gebracht alvorens ze te vermalen en te mengen. Deze methode vereist een hoger energieverbruik later in het productieproces en wordt daarom nog weinig toegepast (Taerwe 2006, p3.7).

de grondstoffen eerst verbrijzeld⁵⁰², alvorens in een kogelmolen tot een fijne poeder te worden gemalen. Nadien worden de fijngemalen materialen nauwkeurig gedoseerd en innig gemengd.

De juist gedoseerde en gemengde grondstof wordt in de tweede productiefase naar een lange, buisvormige draaioven gevoerd, waar de grondstoffen chemisch actief worden en zich verbinden tot 'klinkermineralen'. Bij de productie van wit cement zijn aardgas en zware stookolie de meest gebruikte brandstoffen in het calcinatieproces⁵⁰³. De temperatuur waarin de klinkermineralen worden 'gesintert'⁵⁰⁴ ligt voor wit cement op 1600°C, wat gevoelig hoger is dan bij normaal Portlandcement en beide kalksoorten. De klinker verlaat de draaioven als ronde korrels. Bij wit cement wordt de hete klinker zeer snel afgekoeld door het materiaal te 'schrikken' met waternevel en lucht, om de trivalente ijzermoleculen te reduceren tot bivalente moleculen, zodat de klinker witter wordt⁵⁰⁵.

In de laatste productiefase wordt de klinker naar grote kogelmolens getransporteerd en daarin tot de gewenste fijnheid gemalen met een toeslag van calciumsulfaat ($\text{Ca}[\text{SO}]_4$), wat wordt bijgevoegd als bindingsvertragend middel. Na het vermalen worden de voldoende fijne korrels van de te grove gescheiden in een turboseparator. De fijne korrels worden opgeslagen en de grove worden nogmaals vermalen⁵⁰⁶.

De milieuimpact van de ontginning van de grondstoffen voor wit cement in groeves werd eerder al besproken. Het is echter het productieproces van het cement zelf dat bij uitstek een grote impact heeft. De hoge temperaturen die nodig zijn voor de calcinatie geven aanleiding tot een hoog energieverbruik, en het gebruik van fossiele brandstoffen veroorzaakt een hoge uitstoot van het broeikasgas CO_2 . In de chemische reacties die aan de basis liggen van de klinkervorming worden tevens grote hoeveelheden CO_2 en zwaveldioxide (SO_2) geproduceerd. Verder zorgt de hoge temperatuur er ook voor dat zware metalen en stikstofoxiden worden uitgestoten. Daarbij is de cementindustrie zeer gecentraliseerd en is het gebruik van energie voor transport dus ook hoog⁵⁰⁷. Het gebruik van wit cement komt de levensduur van de kalkcementpleister dus ten goede, maar tegen een substantiële milieukost. Bovendien wordt de pleister, die voor de rest bestaat uit geo- en biomaterialen, door de toevoeging van cement 'gereduceerd' tot industrieel bouw materiaal, dat in ieder geval niet kan hergebruikt worden. Berge (2009) stelt dat normale cementen als afval relatief inert zijn, zolang ze vrij zijn van additieven. 'Er is nog niet veel bekend over het gedrag of lekkage in het milieu van typische betonadditieven zodra deze worden gestort als afval.'⁵⁰⁸ De vraag is in hoeverre wit cement kan worden beschouwd als normaal.

502. Net zoals bij pure kalksteen worden hier verschillende machines voor aangewend, zoals de kaakbreker en slagbreker. Deze machines werken meestal op diesel. (FABO 2003)

503. Deze brandstoffen worden gebruikt aangezien ze weinig onzuiverheden bevatten die de klinker zouden doen verkleuren, in tegenstelling de fijne poederkool die bij de productie van normaal Portlandcement in de draaioven wordt ingeblazen (AGICO Cement 2022).

504. Dit wilt zeggen dat de materialen een begin van smelting vertonen en daardoor aaneen klitten (Taerwe 2006, p3.7).

505. AGICO Cement 2022

506. Taerwe 2006, p3.7

507. Berge 2009, p98

508. Ibid., p99

C2. Leemputz

De 'leemputz' dient als ondergrond voor de kalkcementpleister en wordt als eerste laag langs buiten aangebracht. Direct pleisteren op een stroleem wand zou immers slechte resultaten geven hebben, aangezien de gedroogde strovezels zouden terugveren tijdens het pleisteren en het pleisterwerk hierdoor scheurt⁵⁰⁹. Voor het zetten van deze laag werd het oppervlak van de leem ondergrond bevochtigd, voor een goede hechting. Vervolgens werd de putz 'krachtig tegen de leemwand aangeworpen' en met een troffel uitgesmeerd en aangedrukt⁵¹⁰. Aangezien er nadien een kalkcementpleister over de putz zou komen, werd het oppervlak sterk opgeruwd door gaten of krassen aan te brengen in de laag⁵¹¹. Ook de uitgedroogde putz werd opnieuw bevochtigd alvorens de kalkcementpleister er op te zetten.

Over de samenstelling van de leemputz is geen informatie beschikbaar. Wel is geweten uit de voorschriften van de architect⁵¹² dat de putz werd gestabiliseerd met een deel cement. De buitenkalkpleister is immers vrij hard doordat er cement in zit, dit kan zonder gepaste tussenlaag problemen geven wat betreft de hechting op de zachtere stroleem. Ook in deze laag werd aldus cement gebruikt, wat de bio-ecologische kwaliteit van wand C niet ten goede komt. Voor de rest bestond het mengsel waarschijnlijk uit ongeveer gelijke delen leemgrond (zie onderdeel 'C3. Stroleem') en water, met een toevoeging van korte strovezels.

C3. Stroleem

Algemeen

Het gros van wand C bestaat uit de niet-dragende stroleem invulling, die instaat voor het thermisch isolatievermogen van de buitenmuur. Het mengsel bestaat uit een niet nader gespecificeerde verhouding tussen water, zanderige leemgrond en tarwestro⁵¹³. De leemgrond werd met de vrachtwagen vanuit Bilzen in bulk op de werf geleverd door het bouwmaterialenbedrijf Huis Gregoor. Het tarwestro was afkomstig uit Noord-Frankrijk, en werd in balen geleverd door Fourage De Clercq. Zoals eerder beschreven werd het stroleemmengsel steeds de dag voordien klaargemaakt. Met een manuele betonmixer werd de leemgrond eerst en vooral in aparte kuipen innig gemengd met water tot een redelijk dun vloeibaar mengsel. Vervolgens werden de strobalen handmatig uiteen getrokken en werden de strobundels in een badkuip gedompeld die met gedeeltelijk met leempap was gevuld, wat eveneens handarbeid was (zie Fig.55). Er werd stro toegevoegd tot een pap met de gewenste consistentie werd bekomen. 's Nachts werd de stroleem tussen 2 zeilen te weken gelegd, waardoor het aanmaakwater in de leem en het stro trok, de massa opnieuw aardvochtig, taaikleverig en verwerkbaar werd⁵¹⁴.

De uitgeharde stroleem is een licht, poreus en dampopen materiaal. Dit maakt het een vrij goede thermische isolator met een beperkte

Leemputz

L x H x B [mm]	~
ρ^* [kg/m ³]	~
Treksterkte [N/mm ²]	nvt
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ^{**} [W/mK]	~
c** [J/kgK]	~

509. Bovendien zou de tussenlaag van leemputz ook weerstand bieden aan de spanningen in de buitenpleisterlaag als gevolg van temperatuurverschillen (Ardui e.a. 1996, pp 103,105).

510. Ardui e.a. 1996, p105

511. Dit opruwen is belangrijk aangezien cement of kalk geen chemische binding aangaat met leem en zich dus mechanisch moet hechten. Wanneer de leemputz nog zacht was kon dit met de vingers gebeuren, in het andere geval werd een spijkerplank gebruikt (Ardui e.a. 1996, p105).

512. Ardui e.a. 1996, p113

Stroleem*

L x H x B [mm]	nvtxnvtx300
ρ^{**} [kg/m ³]	~ 600
Treksterkte [N/mm ²]	nvt
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ [W/mK]	~ 0,17
c [J/kgK]	~ 1300

* Alle waarden werden bekomen uit (Ardui e.a. 1996).

** Gewicht van het uitgedroogde materiaal.

513. De eigenaars maakten het stroleemmengsel 'op gevoel', tot een natte 'pap' werd bekomen die werkbaar was en waarin de samenstellende delen gelijkmatig waren verdeeld (Maes en Verhulst 2022).

514. Ardui e.a. 1996, p71

warmtecapaciteit c. De stroleem is dampopen en hygroscopisch, waardoor het wordt aanzien als een vochtregulerend materiaal⁵¹⁵. Door haar hygroscopisch karakter is de leemgrond uitermate gevoelig voor water. Indien te veel vocht wordt geabsorbeerd, verdwijnt de van der Waals aantrekkingskracht tussen de kleideeltjes en desintegreert het materiaal. Bij vorst kan een te hoog vochtgehalte ervoor zorgen dat de stroleem kapotvriest. Voor deze redenen moet stroleem worden beschermd tegen grondvocht en op een dampopen manier tegen neerslag⁵¹⁶.

Productie, stro (zie Fig.64)

Zoals eerder vermeld⁵¹⁷ fungeert het stro in een aardemengsel als wapening. Enerzijds vangt het trekspanningen op en verdeelt het deze in het materiaal, anderzijds stabiliseren de strovezels het mengsel, waardoor het minder grote volumeveranderingen ondergaat ten gevolge van een gewijzigd vochtgehalte. Daarbij verlaagt stro de vorstgevoeligheid van het mengsel en verhoogt het de erosieweerstand. Naast de functie als wapening levert de strocomponent in stroleem ook de belangrijkste bijdrage aan het isolerend vermogen, door de lucht die wordt vastgehouden in de holle vezels⁵¹⁸. De productie van strobalen berust op diesel voor landbouwvoertuigen.

515. Bedenkingen bij deze eigenschap werden geformuleerd in onderdeel 'A9. Leemfinish'.

516. Ardui e.a. 1996, pp 37,41,103

517. Zie oa. onderdeel 'A8. Basis leem-pleister: productie, strovezels'.

518. Volhard 2015, p55

Op onderstaande kaart is het transport van het stro voorgesteld vanaf Noord-Frankrijk.

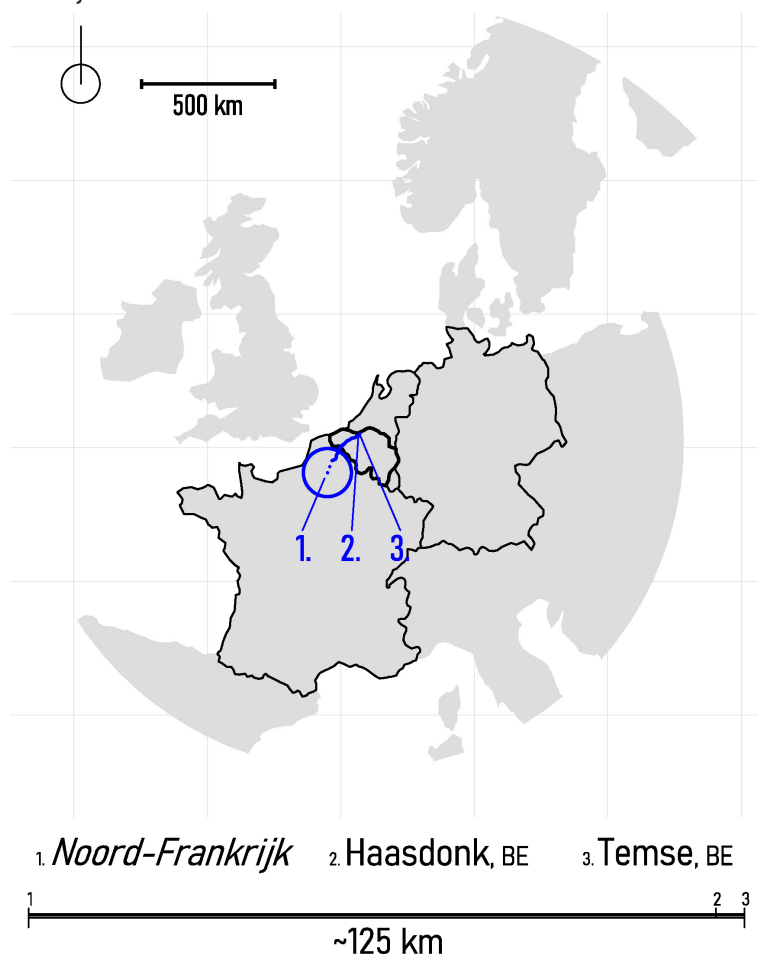


Fig.61:

Transport: strobalen

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

Tarwestro bestaat uit de stengels die overblijven na het oogsten van de tarweplant. Tarwe wordt meestal geoogst door een maaidorser, die de stengels bij de grond afsnijdt en deze in de machine zelf scheidt van de graankorrels en het kaf door een proces van slagen, schudden en uitwaaien. De stengels worden als stro achter de maaidorser in rijen geloosd op het veld. Het eigenlijke persen op balen gebeurt nadien, door een balenpers die wordt getrokken en aangedreven met een tractor. Door dit apparaat wordt het stro opgeharkt, door een vijzel in een rechthoekige schacht gedwongen, gebonden met touw en afgesneden tot strobalen. De balen worden al dan niet meteen beschut opgeslagen zodat ze kunnen uitdrogen.

Stro is aantrekkelijk als bouw materiaal om verschillende redenen: in gebieden waar graan wordt verbouwd is het goedkoop, de benodigde energie voor het productieproces is laag, en omdat het niet kan worden gebruikt om vee te voeden, is er een overvloed aan⁵¹⁹. Het op industriële schaal verbouwen van graangewassen is echter niet zonder milieuimpact, aangezien de productie van graan vaak gebaseerd is op een extensieve gebruik van synthetische meststoffen en pesticiden⁵²⁰. Desondanks zijn tarwestrobalen als restproduct van een voedselgewas een biomateriaal met zeer lage milieukost, dat bij afbraak zonder problemen in de natuur kan worden uitgestort.

Productie, leemgrond (zie Fig.64)

Leemgrond is een grondsoort die voor het grootste deel bestaat uit silt⁵²¹. Het belang van de 'vette' of kleirijke leemgrond voor de sterkte van de stroleem werd al besproken in onderdeel 'A8. Basis leempleister: productie, kleideeltjes'. De leemgrond in wand C bestaat voor het grootste deel uit een ongewijzigd geomateriaal; vette leem afkomstig uit een spaarbekken in Bilzen. Wegens het hoge kleigehalte werd deze leem echter nog verschaald met een klein deel zand⁵²², aangezien een grond met een te hoog kleigehalte weinig vormvast is onder een veranderend vochtgehalte en dus niet geschikt als bouw materiaal. De verwerkingsoperaties die aan de basis liggen van dit materiaal blijven echter zeer eenvoudig en energiezuinig. Nadat de organische toplaag was afgegraven werd hetzelfde gedaan met de leemgrond⁵²³. Vervolgens werd de grond gedurende weken verweerd door ze in perken van 50cm hoog bloot te stellen aan zon, regen en vorst, wat de leemgrond verbrijzelde en ze onsamenvast en kruimelig maakte⁵²⁴. Ten slotte werd de grond met de gewenste fractie zand⁵²⁵ samengevoegd in een mengtrommel.

Volgens de eigenaars was de grond in kwestie al getest op een redelijk geschikte korrelverdeling en werd het materiaal daarom uit Bilzen aangevoerd en niet van dichtbij⁵²⁶. Hoewel dit een euvel is dat een zeer lokale 'productie' van geomaterialen in de weg staat, kan de stroleem C3 toch worden beschouwd als een geo-en biomateriaal in de meest zuivere zin van het woord. De nodige productieprocessen waren immers zeer beperkt, en de materialen behouden bijna volledig hun natuurlijke vorm.

519. Ashby 2013, p594

520. Berge 2009, p176

521. Een sedimentklasse waarvan de deeltjes een grootte hebben tussen de 2 en 63 micrometer.

522. De mengverhouding tussen deze samenstellende delen is bepalend voor de structurele eigenschappen van het materiaal. Hiervoor zijn granulometrische curven opgesteld voor de verschillende aardebouwtechnieken (dragend of niet-dragend, groot of klein aandeel stro,...) (Ardui e.a. 1996, p67).

523. Waarbij er op gelet wordt dat de grond in dunne plakken (< 20cm) wordt afgegraven (zie onderdeel 'A8. Basis leempleister: productie, kleideeltjes').

524. Dit proces, waarin de grond wordt gehomogeniseerd om goed te kunnen mengen met water tot een bouw materiaal, berust op exact dezelfde principes als werd beschreven in onderdeel 'A8. Basis leempleister: productie, kleideeltjes', waar een mechanisch en dus tijdsefficiënter maar energie-intensiever proces werd besproken.

525. Zie onderdeel 'A1. Basislaag kalkpleister: productie, kwartszand'.

526. Allicht had de architect daarnaast ook eenvoudigweg al samengewerkt met de leverancier, die toegang had tot de betreffende ontginningssput (Maes en Verhulst 2022).

Op onderstaande kaart is het transport van de leemgrond voorgesteld vanaf Bilzen.

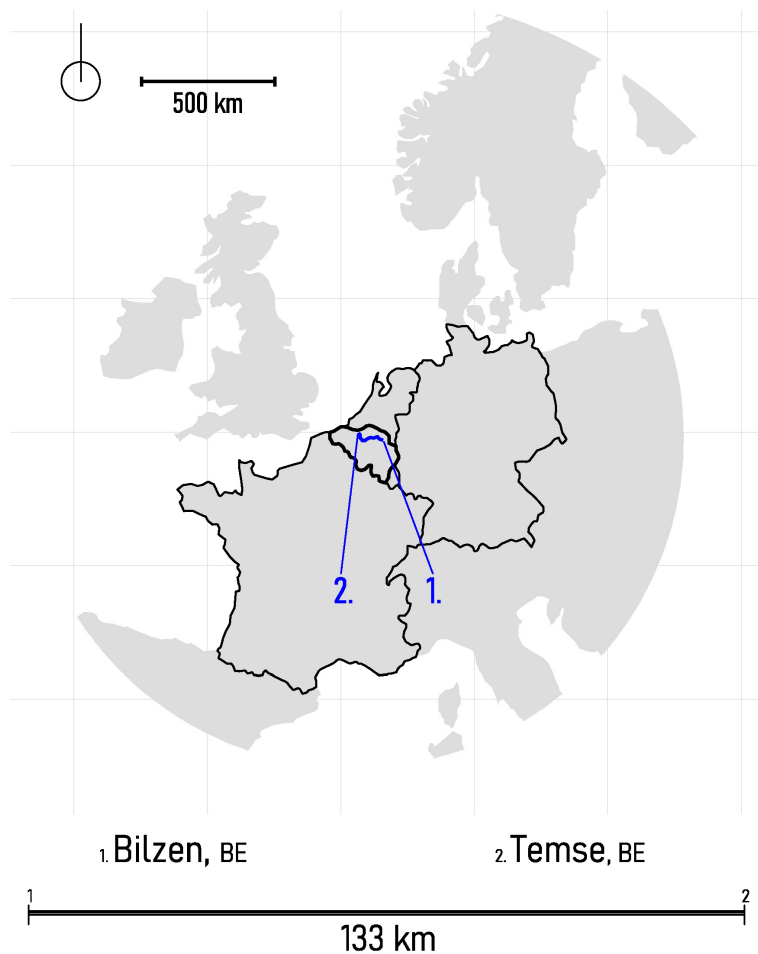


Fig.62:

Transport: leemgrond

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

C4. Houtskelet

Het houtskelet in wand C dient niet enkel als skelet voor de niet-dragende stroleem, maar draagt ook de verdiepingsvloer⁵²⁷ en de dakplaat. Het bestaat uit ont dubbelde stijlen (h.o.h. afstand 650mm) die worden gevormd door 2 'kepers' met sectie 60x60mm, gemonteerd met 60mm tussenafstand. Tussen de ont dubbelde stijlen werden schuine windverbanden geplaatst. Alle skeletonderdelen bestaan uit ongeschaafd lorkenhout⁵²⁸, aangekocht bij de bouwmaterialenverdelers Ecomat. Het hout is afkomstig uit België⁵²⁹, al is de precieze afkomst niet gekend. Het bewerken van lorken tot constructiehout kan op meerdere manieren gebeuren, een frequent toegepast proces wordt beschreven in onderdeel 'A6. Houtskelet'. De productie berust op gemechaniseerd transport (vellers, forwarders, tractors en vrachtwagens op diesel) en elektriciteit en water voor de productielijn in de fabriek.

Lorkenhout is de hardste en duurzaamste Europese naalddhoutsoort⁵³⁰. Om deze reden werd het constructiehout in wand C niet op voorhand behandeld. Nadat het houtskelet was geplaatst waren de eigenaars volgens het bestek echter verantwoordelijk voor de nabehandeling

Lorkenhout*

L x H x B [mm]	nvtx60x60
ρ^{**} [kg/m ³]	600
Treksterkte [N/mm ²]	101
Druksterkte [N/mm ²]	54
λ [W/mK]	nvt
c [J/kgK]	nvt

* Alle waarden werden bekomen uit (Belgian Woodforum 2022b).

** Bij vochtgehalte van 15%.

527. Waar de verdiepingsvloer wordt afgedragen werden zwaardere stijlen toegepast.

van het hout met borax, verdund met water⁵³¹. Borax is een mineraal dat wordt geproduceerd uit kerniet. Door de reactie van borax en zwavelzuur ontstaat boorzuur. Borax en boorzuur worden gebruikt als fungiciden in het impregneren van hout. Boorverbindingen zijn matig giftig, en in grotere concentraties tasten zij planten en vissen in zoet water aan⁵³². Ook in dit geval komt het impregneermiddel de 'durability' van de structuur ten goede, maar moet ze daardoor inboeten aan 'sustainability'.

Een overzicht van het materiaal wordt gegeven in Fig.65 .

C5. Leempleister

Het binnenoppervlak van wand C werd afgewerkt met een leemputz (10mm dikte), op dezelfde manier als aan de buitenkant, waarop vervolgens een dunne leempleister (5mm) werd gezet. Over de samenstelling van deze laag is echter geen informatie beschikbaar. Het pleisteren werd gedaan door pleisterwerker Jan Vloemans, uit Ravels, die tevens het mengsel zelf samenstelde. Gezien de fijne oppervlaktetextuur en de lichte kleur werd de pleister waarschijnlijk samengesteld uit vette leem die werd vermagerd met lichtkleurig zand⁵³³ met gevarieerde korrelgrootteverdeling.

- 528. Ardui 1996, pp 13,14
- 529. Maes en Verhulst 2022
- 530. Het kernhout is matig duurzaam (natuurlijke duurzaamheidsklasse III) en is gevoelig voor aantasting door termieten. Het spinhout is niet duurzaam (natuurlijke duurzaamheidsklasse V) (Belgian Woodforum 2022b).
- 531. Ardui 1996, p13
- 532. Berge 2009, p91
- 533. Zie onderdeel 'C3. Stroleem'.

Fig.63:
C1. Cementkalkpleister
Flowchart productie

Percentages worden uitgedrukt in volumedelen van de aangebrachte pleister.

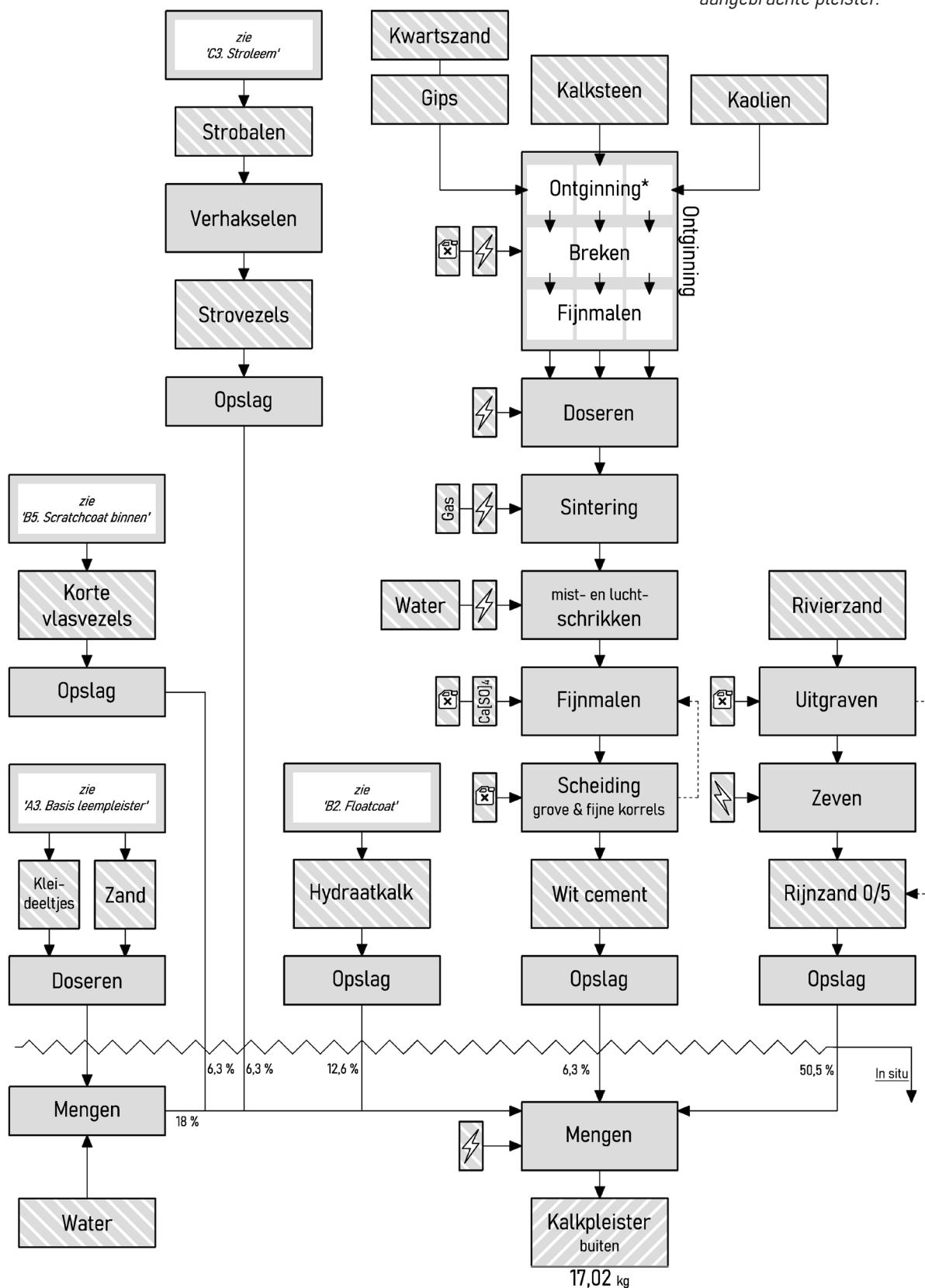


Fig.64:
C3. Stroleem
Flowchart productie

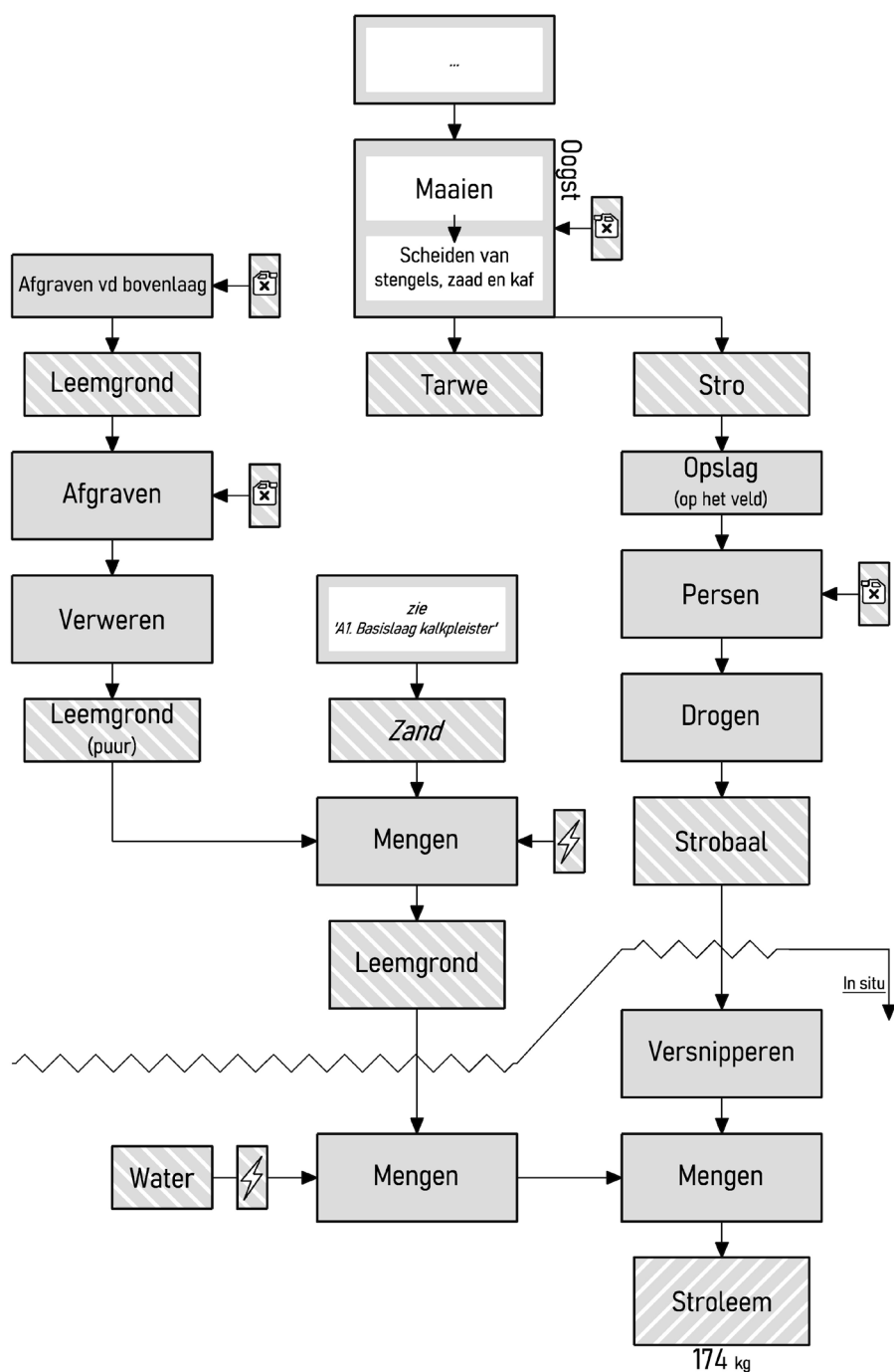
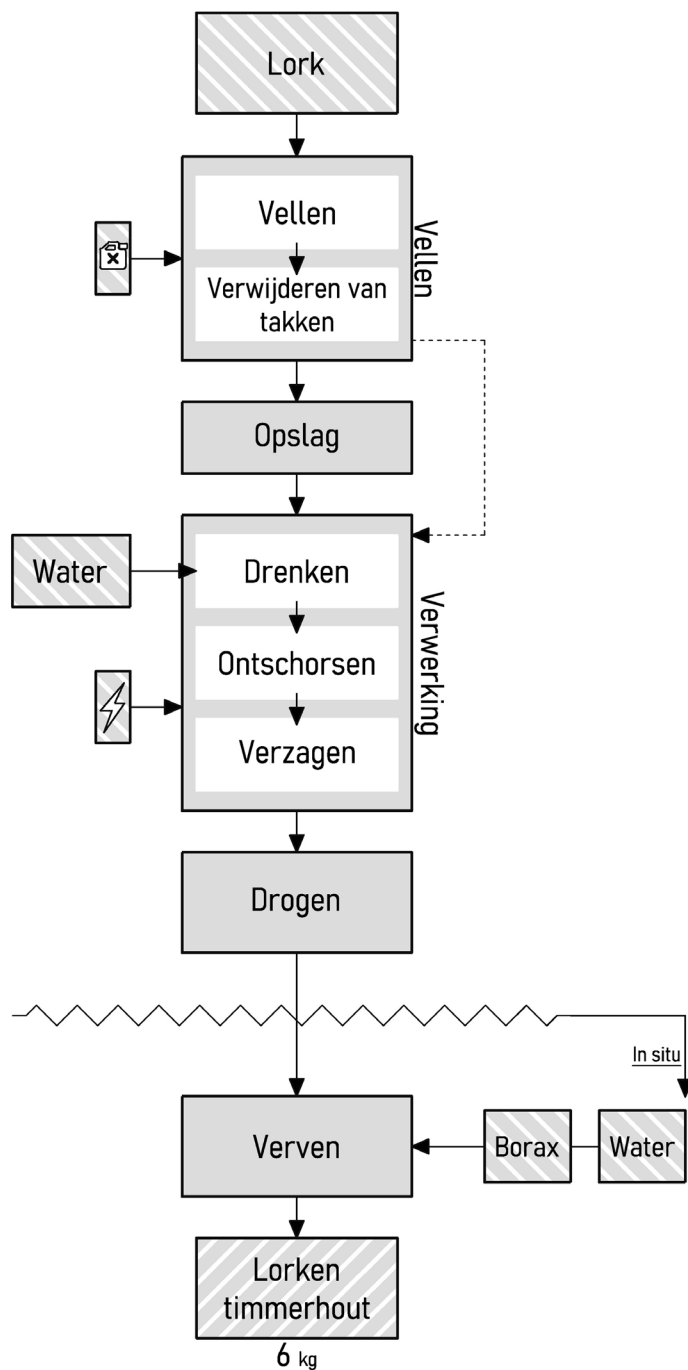


Fig.65:
C4. Lorkenhout
Flowchart productie



Wand D: Stobalen in nieuwbouw, Balegem

Wand D maakt deel uit van de buitenmuur van een vrijstaande duplex nieuwbouwwoning in Balegem⁵³⁴ (zie Fig.66), waarvan de werf werd gestart in de lente van 2021. De woning is opgebouwd uit een houtskelet dat volledig – zowel muren als daken – werd opgevuld met stobalen. De wand werd langs de buitenkant al bezet met een kalkpleister in verschillende lagen en wordt in de zomer van 2022 langs de binnenkant afgewerkt met leempleisters.

Ter verduidelijking van de opbouw wordt verwezen naar Fig. 72 . Een detail van de muurvoet (aansluiting op de ter plaatse gestorte strookfundering) is getekend in Fig. 73 .

Hoewel woning D de jongste leeftijd heeft⁵³⁵, doet ze van alle beschouwde cases het meest denken aan de vakwerkbouw van weleer. De draagstructuur van de stobalen woning bestaat immers uit een houten 'paal-balksysteem' (zie Fig.69) waarvan de kolommen en balken door de producent al volledig op maat werden gezaagd alvorens het transport naar de site, waar het geheel met behulp van een kraan in elkaar werd gebouwd door de hoofdaannemer. De woning bestaat uit 3 traveeën, afgebakend door dragende dwarsportieken die het interieur structureren. De meeste binnenwanden – houtskelet – hebben geen dragende functie⁵³⁶, en werden zo gemaakt dat ze eenvoudig kunnen worden weggenomen. De buitenwand, waarin enkel de hoofdkolommen het dak en de verdiepingsvloer dragen, bestaat uit stobalen (D5) van 36cm breed. De balen, die voorzien in de thermische isolatie van de wand, werden op de muurvoetplaat gestapeld⁵³⁷, aan elkaar 'genageld' met gepunte wilgentakken (D4) en ten slotte samengeperst tussen de secundaire stijlen (D6) en raveelbalken (zie Fig.70). Op deze manier werd een zeer robuuste wand bekomen die als ondergrond zou dienen voor de pleisters. De buitenpleister bestaat uit 2 lagen die elk in 2 keer werden gezet (zie Fig.68). De eerste laag, die dient als basislaag op de stobalen en als waterdichting van de wand, is een traskalkpleister (D3) (30+10mm dikte), waarbij in elk van de 2 deellagen een glasvezel wapeningsnet (D2) werd geduwd. De buitenkant van de wand werd afgewerkt met een 8mm dikke gekleurde kalkpleister (D1). Het binnenpleisterwerk zal worden uitgevoerd als een combinatie van een 20mm dikke basisleempleister (D8) en een fijne leemfinish (D9) (3mm dikte) of grove leempleister. Om de hechting van de pleister op de houten skeletonderdelen te verzekeren werden er stromatten (D7) op maat gesneden en tegen het hout geniet (zie Fig.70). Aangezien de binnenpleisters nog niet werden aangebracht of zelfs gekend zijn werden ze niet in de analyse opgenomen.

Aangezien het een nieuwbouw betreft ligt het voor de hand dat de woning voor een deel tot stand is gekomen door professionele arbeid. Zo ontwierpen de eigenaars hun woning samen met Architectengroep Barchi, werd de houten draagstructuur⁵³⁸ en het invulwerk in de buitenwand door de hoofdaannemer Building Passion Bouwteam geplaatst, en worden alle pleisterwerken en de Argiofloor⁵³⁹ vloerafwerking door pleisterwerker Stijn Pieters gedaan⁵⁴⁰. Een groot deel van het constructiewerk – met name van de buitenwand – was echter ook zelfbouw. De stobalen werden door de eigenaars zelf aangeschaft en geplaatst. Om te beginnen werd er op de houten muurvoetplaat een metalen gaas bevestigd tegen ongedierte. Vervolgens werden de balen volgens plan gestapeld, op het gaas, tussen de kolommen

534. De contactpersonen, zelfbouwers en eigenaars van de woning, zijn Luc Deschepper en Inge Van de Weghe.

535. Woning D is nog niet afgewerkt wanneer deze scriptie wordt ingeleverd.

536. 2 binnenwanden functioneren als windverband in de paal-balkconstructie, en zijn aldus niet wegneembaar.

537. Er komt heel wat voorbereidings- en ontwerpwerk kijken bij wat een organische manier van bouwen lijkt. Zo werden voor de start van de werf plannen opgemaakt van de stapelwijze van de stobalen.

538. Van de betonnen strookfundering tot aan de dak (incl. afwerking).

539. Argio Floor is een harde pleister van leem, kalk en gips, geschikt als vloer- of wandbekleding, van de producent Aeris (Aeris z.d.).

540. Naast de vermelde bouwbedrijven werden o.a. de vloer, technieken en buitenschrijnwerk uitgevoerd door andere onderaannemers.

541. Zo konden de stobalen langs binnen tegen de planken worden gezet, zodat het muuropervlak langs buiten al recht was en dus weinig nageschoren moest worden. De ruwe bekistingsplanken werden later gebruikt als dragers voor bevestiging van rietmatten tegen het plafond.

542. Door het aanduwen van de balen moesten deze 'wilgen-nagels' een stuk korter worden gemaakt dan de hoogte van 2 rijen gestapelde balen.

543. In werkelijkheid gaat het steeds over 2 balken van 60x180mm, die achter elkaar worden geplaatst om zo de volledige dikte van de strobaal te halen.

en secundaire stijlen, en tegen bekistingplanken⁵⁴¹ die langs buiten om de 40cm aan het skelet waren geschroefd. Het stapelen gebeurde in 2 rijen van ongeveer 48cm hoog. Daarna werden ze aan elkaar genageld met gepunte wilgentakken⁵⁴². Om de balen aan te drukken werd een raveelbalk⁵⁴³ tijdelijk met hoekijzers vastgezet aan de verticale structuurelementen, ongeveer 50cm boven de balen⁵⁴⁴. Door vervolgens een raveelbalk op de balen te leggen kon het stro worden aangepast met autokrikken, die tussen de vaste en losse balk werden geplaatst (zie Fig.71). Op deze manier kon een strobaal van 48cm tot 10cm worden aangeduwd⁵⁴⁵. In dit werk werden de eigenaars soms bijgestaan door '3 vrienden'⁵⁴⁶. Een eenvoudige berekening toont dat de kostprijs in tijd van het plaatsen van de strobalen in het houtskelet van wand D – minstens en ongeveer – 0,57 manuren/ m² of 34 min/ m² is⁵⁴⁷. Nadien werd het wandoppervlak langs binnen nog bijgewerkt, wat later wordt besproken.

De 4-lagige buitenpleister werd door de pleisterwerker aangebracht met een spuitmachine, in een werkwijze die sterk lijkt op wat werd gedaan bij wand A⁵⁴⁸. De 1e basislaag op de strobalen is een 40mm dikke traskalkpleister. Deze laag werd na het spuiten ingewreven in de strobalen en opgeruwd, alvorens er een glasvlies wapeningsnet in werd geduwd. Door de droge en winderige weersomstandigheden bedroeg de droogtijd van deze laag 'slechts' 4 weken. De 2e basislaag werd op dezelfde manier gezet, en hier werd ook een wapeningsnet in geduwd. De droogtijd van deze laag was veel korter⁵⁴⁹ aangezien 'deze laag geen vocht meer uit het stro trok en de 1e dat wel deed'⁵⁵⁰. De dubbele basislaag werd afgewerkt met een gekleurde kalkpleister (zie Fig.67). Deze werd eerst 5mm dik gespoten en geëgaliseerd met een plakmes. Vervolgens, na slechts 30 minuten droogtijd, werd de 2e afwerkingslaag 3mm dik op de vochtige 1e laag gezet. Na opnieuw 30 minuten wachttijd werd de vochtige kalkpleister nat gesponst om een egaal oppervlak te verkrijgen. De kostprijs in tijd voor de basis traskalkpleister bedroeg 0,34 manuren/ m² of 20 min/ m² ⁵⁵¹ voor de 1e laag en 0,29 manuren/ m² of 17 min/ m² voor de 2e laag. De dubbele afwerkingslaag kostte – inclusief droogtijden – 0,57 manuren/ m² of 34 min/ m². In totaal werd er per m² buitenpleister 72 minuten gewerkt⁵⁵².

544. Meestal werd deze werkwijze gehanteerd, maar in bepaalde gevallen, zoals onder een raam, werd de vaste raveelbalk van het raam gebruikt die al was gemonteerd door de aannemer.

545. Dit aanpersen was vereist om een stevig en dus bewerkbaar wandoppervlak te creëren. Het compacteren van een materiaal doet de isolatiewaarde echter dalen door het verkleinen van de fractie aan luchtholtes. Strobalen zijn echter van nature zo 'luchtig', dat een zekere compactie net een gunstig effect zal hebben doordat de vezels daardoor in een meer dense structuur worden geschikt en de lucht zo beter vasthouden. Allicht werden de balen in dit geval noodzakelijkerwijs wel voorbij dit optimum aangeduwd.

546. Deschepper 2022

547. De opake oppervlakte van de wand bedraagt 6,97 m². 2 man heeft 'ongeveer' 2 uur gewerkt om deze wand op te vullen.

548. Zie onderdeel 'Wand A: Beschrijving'.

549. Het Lastenboek Strobalenbouw van Architectengroep Barchi vermeldt een droogtijd van 1 dag/mm pleisterdikte voor de 2e laag. De 1e laag wordt aangemaakt met 'te veel' water zodat de mortel eigenlijk te plat is maar zich beter aan de ondergrond kan hechten. (Architectengroep Barchi 2016, p110).

550. Deschepper 2022

551. In deze tijd zit ingerekend: het plaatsen stellingen, het plaatsen van pleisterprofielen aan de raamopeningen en het afplakken van buitenschrijnwerk en de dakspanten.

552. Gegevens afkomstig uit de meetstaat.



Fig.66:
Wand D: context

Wand D maakt deel uit van de buitenmuur van een vrijstaande strobalewoning. Het betreft een nieuwbouw uit 2022.

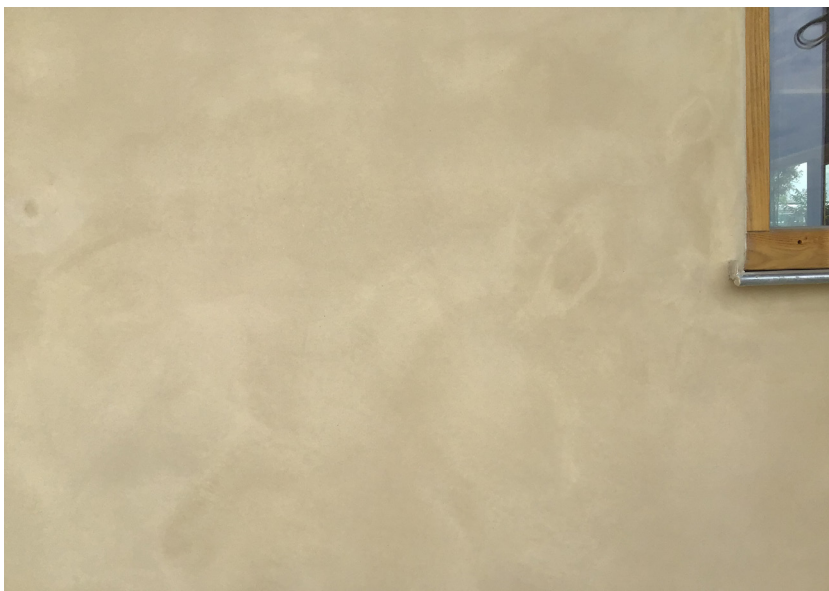


Fig.67:
Wand D: detail afwerking

Wand D werd langs de buitenkant afgewerkt met een gekleurde kalkpleister.



Fig.68:
Wand D: buitenpleisters

De wand werd in totaal 4 keer bezet langs buiten: een dubbele basislaag in traskalk en een dubbele kalkpleister afwerking.



Fig.69:
Wand D: structuur

Het dragende skelet van woning D werd als bouw pakket op de werf geleverd en met behulp van een kraan in elkaar gezet.



Fig.70:
Wand D: binnenkant

De werkelijkheid is uiteraard gecompliceerder dan de beschouwde typische m2 wand. De balk onder de raveelbalk werd geplaatst in functie van het keukenaanrecht dat op deze plek zal worden geïnstalleerd. De stromatten linksonder op de foto worden later op het hout geniet om een goede hechting van de leempleister mogelijk te maken.



Fig.71:
Wand D: constructie

In dit geval werden de krikken, waarmee de strobalen werden geperst, gestut onder de raveelbalk.

Fig. 72:

Wand D type m2

buiten

1. Kalkpleister pigment

Finish	3mm
1e laag	5mm

Traskalk

2. Wapeningsnet	
3. 2e laag	10mm

Wapeningsnet	
1e laag	30mm

5. Strobaal 360mm

6. 2x Raveel	2x 180mm
--------------	----------

4. Wilgentak	25mm
--------------	------

(Leempleister)

(Basis leempleister)	20mm
(Leemfinish)	3mm

binnen

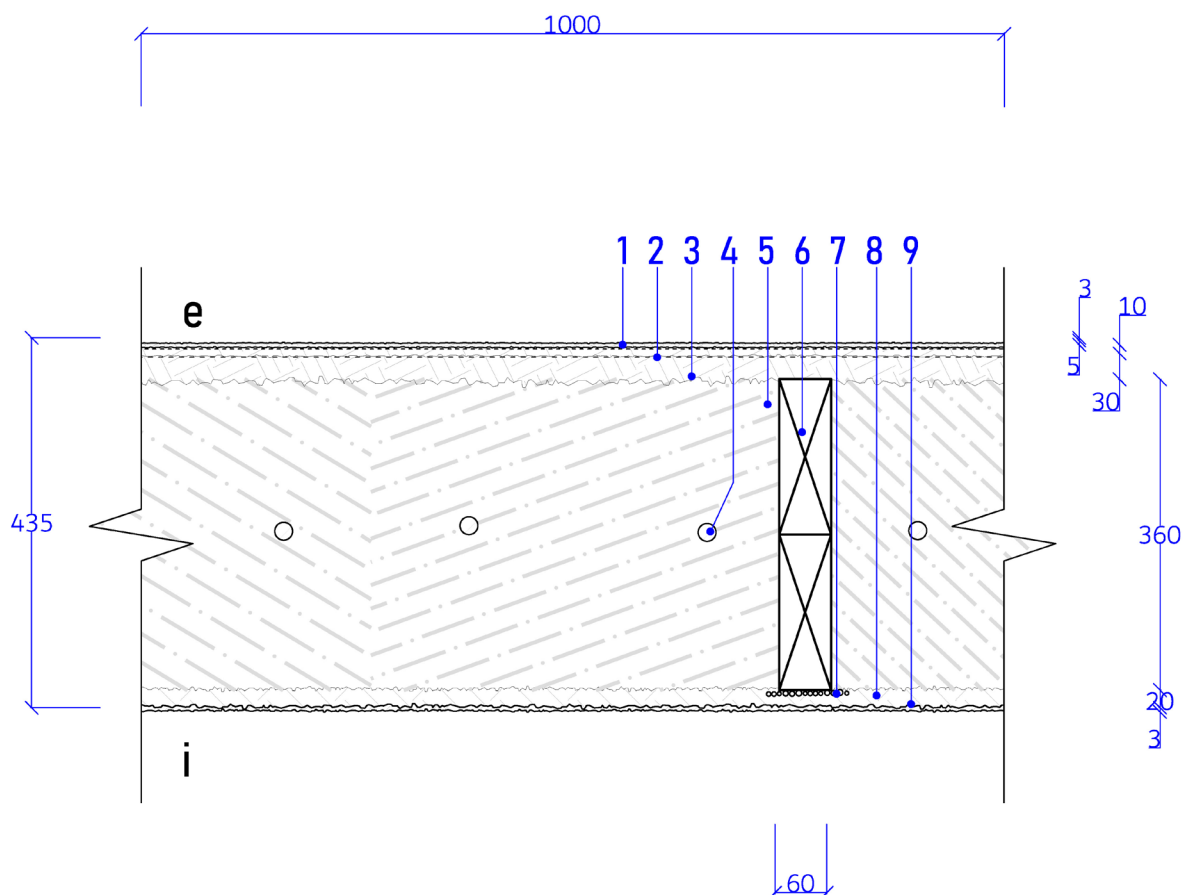


Fig. 73:

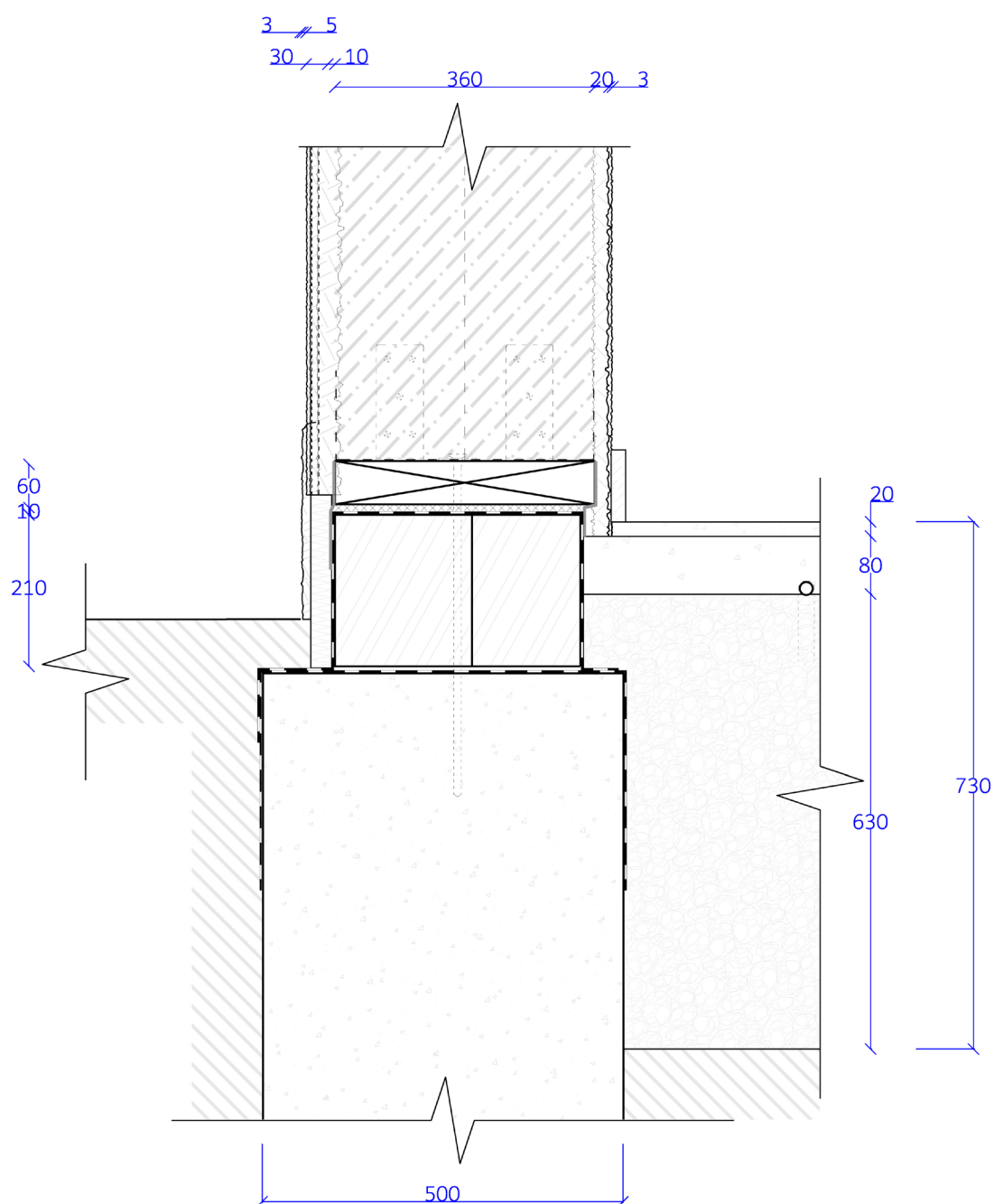
Wand D muurvoet

Vloeropbouw

binnen

Argiofloor	20mm
Cementchape	80mm
Volle schelpen	630mm

bodem



D1. Gekleurde kalkpleister

Algemeen

De buitenste laag van wand D bestaat uit een in de massa gekleurde kalkpleister. Het betreft het product **RC Kalei**⁵⁵³ van de producent Reynchemie, wat een kaleimortel is op basis van natuurlijke hydraulische kalk (NHL 3.5)⁵⁵⁴ en zeer fijne 'minerale vulstoffen' (korrelverdeling 0,05 – 0,63mm). De pleister wordt verpakt in zakken van 25kg. Het materiaal wordt in situ gekleurd door een pigment in poedervorm⁵⁵⁵ op te lossen in een met water gevulde mengkuip. Nadat de gekleurde oplossing gedurende 5 minuten gemengd was werd ze gebruikt als aanmaakwater voor de pleister. De pleister werd in 2 dunne lagen met een spuitmachine nat-in-nat aangebracht.

Productie, hydraulische kalk (zie Fig.77)

De hydraulische kalk is afkomstig van de fabrikant Saint-Astier®, gevestigd in St-Astier, Frankrijk. De eigenschappen en het productieproces van hydraulische kalk werden eerder al besproken. De ontginning van deze kalk gebeurt daarentegen in gesloten mijnbouw, die zich op de productiesite bevindt. De werkwijze in deze vorm van mijnbouw is gelijkaardig als in open groeves, behalve dat er veel kleinere volumes gesteente in één keer worden ontgonnen. Horizontale rupsboren boren kleinere gaten in de rotswand die door 'poederladers' worden gevuld met een mengsel van ammoniumnitraat en diesel. Na ontsteking wordt het 'dak' van de mijngang vast gebout, en de kalksteenbrokken door graafmachines verwijderd en naar de verwerkingsinstallatie getransporteerd⁵⁵⁶.

RC Kalei*

L x H x B [mm]	nvtxnvtx8
ρ^* [kg/m ³]	1300
Treksterkte [N/mm ²]	nvt
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ^{**} [W/mK]	~ 0,3
c^{**} [J/kgK]	~ 1000

* Alle waarden werden bekomen uit (Reynchemie z.d.)

** Waarde bij ontstentenis, gebaseerd op A1: Basislaag kalkpleister.

553. Reynchemie NV/SA 2022, p1

554. Zie onderdeel 'A1. Basislaag Kalkpleister: productie, hydraulische kalk'.

555. Waaruit dit pigmentpoeder bestaat is informatie die niet wordt vrijgegeven door Reynchemie. Wel is geweten dat het poeder van natuurlijke oorsprong is (Pieters 2022).

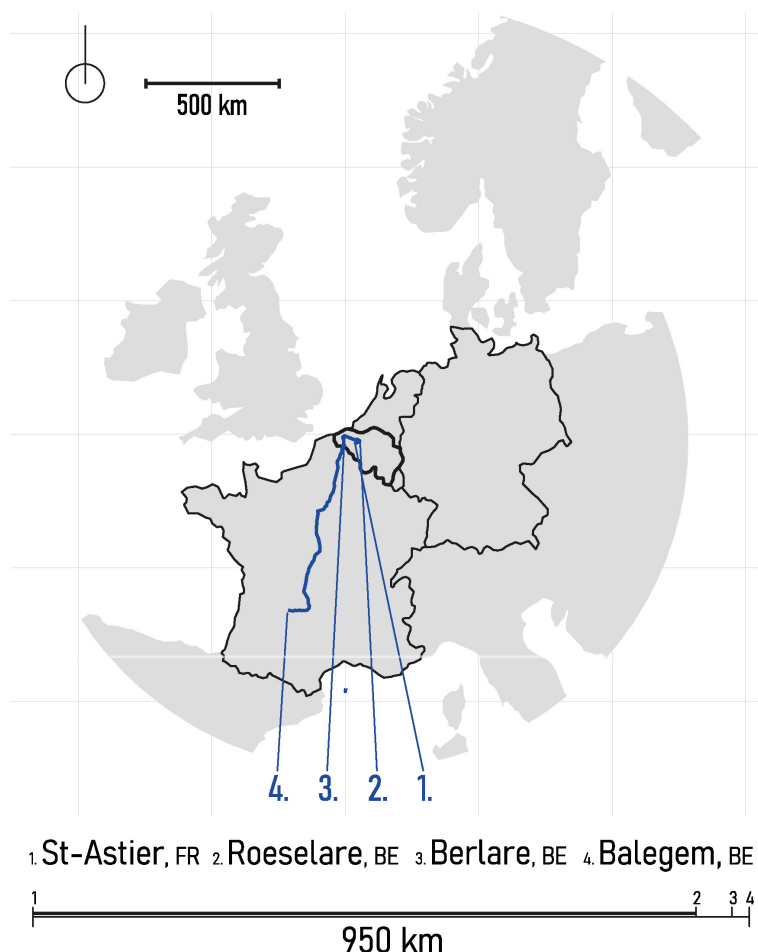


Fig.74:

Transport: gekleurde kalkpleister

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

Op bovenstaande kaart is het transport van de hydraulische kalk voorgesteld vanuit St-Astier. Waar de minerale vulstoffen werden ontgonnen is niet gekend.

Gesloten of ondergrondse mijnbouw kan uit milieu- en sociaal oogpunt aanvaardbaarder worden geacht dan open mijnbouw aangezien de ondergrondse variant vaak een kleinere voetafdruk heeft dan een open groeve met een vergelijkbare ontgincapaciteit. De voornaamste milieutechnische voordelen van gesloten mijnbouw zijn dat in het algemeen alleen ertsen of zuivere gesteenten worden ontgonnen en afvalgesteente wordt achtergelaten⁵⁵⁷, wat transportkosten en de vraag naar stortplaatsen reduceert⁵⁵⁸. Verder worden de ecosystemen die zich aan de oppervlakte bevinden in veel mindere mate beschadigd, al is de impact op de bovengrond niet onbestaande. De belangrijkste mogelijke gevolgen van ondergrondse mijnbouw zijn verzakkingen en het afglijden van hellingen, veroorzaakt door de gecreëerde holtes en trillingen door explosies, en met alle gevolgen van dien voor vegetatie en de bebouwde omgeving. Verder wordt ook bij ondergrondse mijnbouw het grondwater soms verlaagd, wat kan bijdragen aan deze fenomenen⁵⁵⁹.

Productie, minerale vulstoffen (zie Fig.77)

Het skelet van de pleister wordt gevormd door minerale vulstoffen. Het is niet duidelijk over welk materiaal het gaat. Vermoedelijk wordt er een fijne zandsoort bedoeld⁵⁶⁰.

D2. Wapeningsnet

In elk van de 2 deellagen van de basiskalkpleister werd een wapeningsnet geduwd. In de 1e laag was dit een dubbel gestikt wit net met grote mazen, in de 2e laag werd een geel net met kleinere mazen gebruikt (zie Fig.68). Er werden 2 verschillende wapeningsnetten gebruikt doordat de 1e deellaag veel dikker werd gezet en daardoor door een steviger net moest worden gewapend⁵⁶¹. Het net zorgt ervoor dat het oppervlak van de pleisterlagen werd geëgaliseerd en door de pleister te wapenen worden (grote) scheuren vermeden, wat een extra risico is bij bepleisteren van het onregelmatige strobale oppervlak.

Het wapeningsnet is gemaakt uit glasvezel. Meer informatie over het gebruikte product is echter niet geweten, daarom wordt net zoals in onderdeel A2 uitgegaan van [Sto-Glasweefsel](#)⁵⁶². Glasvezel is een uitermate licht materiaal met een hoge treksterkte, en is alkalibestendig, wat het bruikbaar maakt als wapening in een kalkpleister. Het toepassen van de kunststof wapeningsnetten hypothekeert echter wel de end-of-life mogelijkheden van de traskalkpleister, wat van de buitenpleister een wandonderdeel maakt dat niet gerecycleerd kan worden.

- 556. Great Mining z.d.
- 557. Om dit te kunnen doen zijn echter wel voldoende zuivere erts- of gesteentelagen nodig.
- 558. Sahu, Prakash, en Jayanthu 2015, p3
- 559. Altun, Yilmaz, en Yildirim 2010, p4
- 560. Zie onderdeel 'A1. Basislaag kalkpleister: productie, kwartszand'.

Sto-Glasweefsel*	
L x H x B [mm]	nvtxnvtx ~1
ρ [kg/m ³]	0,165
Treksterkte** [N/50mm]	1000
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ [W/mK]	nvt
c [J/kgK]	nvt

* Alle waarden werden bekomen uit (Sto Isone bv 2020).

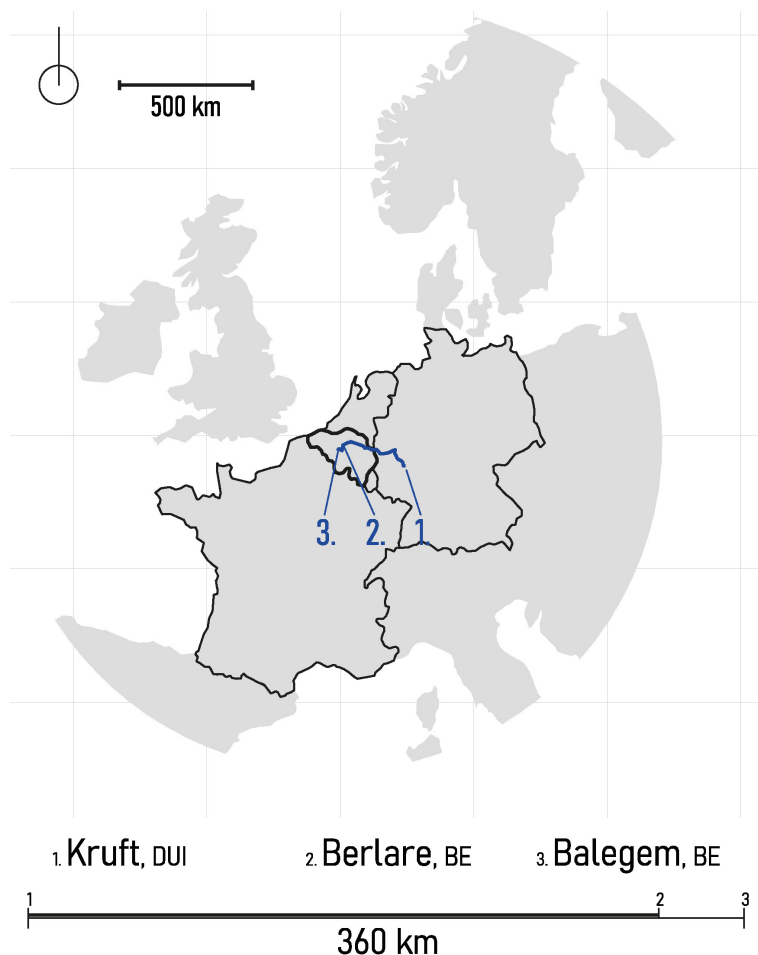
** Resterende treksterkte na veroudering.

- 561. Pieters 2022
- 562. Zie onderdeel 'A2. Wapeningsnet: productie'.

D3. Basis traskalkpleister

De basislaag die enerzijds de stroleemwand egaliseert en anderzijds de waterdichtheid van de wand verzekert is opgebouwd uit 2 traskalklagen (30+10mm)⁵⁶³, die beiden op het stro-oppervlak werden gespoten. Traskalk is – logischerwijs – een mengeling van fijngemalen tufsteen en hydraatkalk. Deze binder wordt in een niet gekende verhouding gemengd met ‘gegradeerde gesteentekorrel’ en ‘lichte minerale toeslagmaterialen’ tot een droge pleister met korrelverdeling (0 – 2mm)⁵⁶⁴. Het betreft de **TKP-L Lichte traskalkpleister** van de producent Tubag uit Kruft, Duitsland⁵⁶⁵. De pleister is verkrijgbaar in zakken van 30kg, waaraan ca. 11,5 liter water moet worden toegevoegd. De uitgeharde pleister heeft een lichtgrijze tot beige kleur en is zeer waterdicht maar tegelijk dampopen.

Op onderstaande kaart is het transport van de gemengde traskalkpleister voorgesteld vanuit Kruft.



Productie, traskalk (zie Fig.78)

Het puzzolane materiaal tras wordt verkregen door het vermalen van tufsteen. Wanneer hydraatkalk (in poedervorm) wordt toegevoegd aan verbrijzelde tufsteen en deze componenten samen worden vermalen, wordt traskalk geproduceerd. Het toevoegen van kalk vóór

TKP-L Lichte traskalkpleister*

L x H x B [mm]	nvtxnvtx10
p** [kg/m3]	1380
Hechttreksterkte [N/mm2]	>0,08
Druksterkte [N/mm2]	>2,5
λ [W/mK]	<0,39
c [J/kgK]	~

* Alle waarden werden bekomen uit (Tubag 2021).

** Gewicht van de natte pleister.

Fig.75:
Transport: traskalkpleister

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

563. De dikte van de 1e laag is zeer ongelijkmatig aangezien deze laag rechtstreeks op de strobalen werd gezet.

564. Tubag 2021, p1

565. Niet toevallig is dit dezelfde plaats als waar de producent Trasswerke Meurin is gevestigd (zie onderdeel 'B1. Floatcoat kalkpleister, buiten'). Tufsteen wordt immers voornamelijk gewonnen in de Duitse Vulkaaneifel.

de vermalen van de steen zou bijdragen aan een betere menging van beide componenten, en een fijnere korrelgrootte van de tras. Hoe fijner de korrel, hoe reactiever de tras wordt in combinatie met kalk⁵⁶⁶. De reactie van tras met hydraatkalk vormt een hydraulisch bindmiddel, waardoor tras een bijdrage levert aan de verhardingssnelheid, de sterkte, en de watergevoeligheid van de kalkpleister. Deze werking werd al besproken in onderdeel 'A5. Kalkhennep: productie, additief'.

De productie van de traskalk – lees: het vermahlen van de tufsteen – vindt plaats in Kruft, Duitsland. Waar de kalksteen wordt gewonnen en verwerkt tot hydraatkalk is niet gekend. De productieprocessen van tras en hydraatkalk werden al besproken in onderdelen 'B1. Floatcoat kalkpleister, buiten' en 'A5. Kalkhennep'.

Productie, gegraadeerde gesteentekorrel (zie Fig.78)

Een deel van de granulaten in de traskalkpleister bestaat uit een gegraadeerde gesteentekorrel⁵⁶⁷. Wat met deze term wordt bedoeld is niet duidelijk. Vermoedelijk gaat het over een verbrijzeld kalkgesteente, waarbij de fijne korrels (< 2mm) er uit werden gezeefd zodat een fijn granulaat met goede korrelverdeling werd bekomen⁵⁶⁸.

Productie, lichte minerale toeslagmaterialen (zie Fig.78)

Het ander deel van het skelet van de pleister wordt gevormd door lichte minerale toeslagmaterialen, ook hier is niet duidelijk over welk materiaal het gaat. Vermoedelijk wordt er een fijne zandsort bedoeld⁵⁶⁹.

D4. Wilgentak

De stobalen in wand D werden voor het aanpersen aanéén genageld met afgepunten wilgentakken⁵⁷⁰, met een diameter van 2 à 3cm, die met een houten hamer in het stro werden geslagen. In tegenstelling tot de in onderdeel A7 besproken wilgentenen, zijn deze wilgentakken afkomstig van wilgenbomen die geen deel uitmaken van een industrieel verbouwd gewas. Deze takken werden daarentegen als restproduct verkregen door het snoeien van knotwilgen in de straat van woning D⁵⁷¹. De wilgen werden al geknot in de winter van 2020, waarna de takken gedurende 1,5 jaar werden opgeslagen en gedroogd aan de lucht. Dit 'productieproces' berust enkel op een handenarbeid met een snoeischaar, en een mes voor het afpunten.

D5. Strobaal

De stobalen die in wand D werden gebruikt bestaat uit samengeperst en -gebonden tarwestro. De balen zijn 36cm hoog, en werden om die reden op hun zijkant halfsteens gestapeld tussen het houtskelet. De stobalen zijn goede thermische isolatoren⁵⁷². Het materiaal is ook zeer dampopen, wat betekent dat een beperkte condensvorming⁵⁷³ in de wand geen probleem is doordat ze gemakkelijk uitdroogt⁵⁷⁴ (zie

566. Balen en Bommel 2003, p92
567. Tubag 2021, p1
568. Zie onderdeel 'A1. Basislaag kalkpleister: productie, kalksteengranulaten'.
569. Zie onderdeel 'A1. Basislaag kalkpleister: productie, kwartsand'.
570. Per baal werden 2 wilgennagels gebruikt.
571. De knotwilg is een boom die snel groeit. De takken worden om de 2 à 5 jaar gesnoeid om te voorkomen dat ze te zwaar worden en de boom inscheurt of omvalt (Tuinplant.nl 2020). De wilgentakken werden dus verkregen als restproduct van boomonderhoud.
572. Stobalen worden ook vaak als goede akoestische isolatoren aangeprezen. De akoestisch isolerende eigenschappen van een stroleemwand zouden berusten op het massa-veer-massa principe, waarbij de pleisterlagen als (beperkte) massa's dienen en het stro als dempende veer. In het geval van wand D gaat dit echter niet op, omdat de 'veer' zeer frequent wordt kortgesloten door de stijve structurele elementen die raken aan beide pleisters. Een stroleemwand met een verzonken draagconstructie bezit allicht betere akoestische eigenschappen.

Wilgentak	
L x ø [mm]	<900x20
ρ* [kg/m ³]	455
Treksterkte [N/mm ²]	nvt
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ [W/mK]	nvt
c [J/kgK]	nvt

* Waarde bekomen bij (Trada z.d.).

Strobaal	
L x H x B [mm]	800x360x48
ρ* [kg/m ³]	110
Treksterkte [N/mm ²]	nvt
Druksterkte [N/mm ²]	nvt
λ** [W/mK]	0,052
c [J/kgK]	~

* Waarde bekomen uit meetstaat.

** Waarde bekomen uit (Prost, 2013).

ook onderdeel 'A9. Leemfinish'). De balen werden door de eigenaars aangekocht bij boerderij Branswijk in Gavere⁵⁷⁵ en in de zomer van 2021 geplaatst. De werkwijze die werd gevolgd bij het plaatsen van de balen werd al beschreven. Om de juiste afmetingen te bekomen, werden de balen in stukken gezaagd met een handzaag of werd een slijpschijf gebruikt om een hoek uit de balen te zagen. Na de plaatsing werd het stro tegen vocht beschermd⁵⁷⁶ door de woning langs buiten in te pakken met een bouwfolie⁵⁷⁷. De binnenkant van de strowand werd ten slotte 'geschoren' – of afgevlakt – met een haagschaar⁵⁷⁸.

Het productieproces van tarwestrobalen werd al beschreven in onderdeel 'C3. Stroleem'.

D6. Houtskelet

Algemeen

De draagstructuur van woning D bestaat uit een gelamelleerd houten paal-en-balk systeem. Alle onderdelen werden door de producent, zagerij Hoffmann Trade ag in St.Vith, in de houtfabriek op maat gezaagd en gefreesd, waardoor op de werf enkel montagewerk restte. Het secundaire houtskelet in de beschouwde wand D heeft echter enkel als functie de strobalen en het raam in de wand te ondersteunen, en bestaat niet uit gelamelleerde elementen. Het skelet is opgebouwd uit een **geïmpregneerde vuren** onderregel, stijlen en balken. Voor de stijlen werden 2 60x180mm geschaafde en afgeronde spanten gebruikt, die achter elkaar werd geplaatst en met hoekijzers aan de boven- en onderregel werd bevestigd. Ook het vurenhout werd bij Hoffmann aangekocht en geïnstalleerd door de hoofdaannemer.

De eigenschappen van vurenhout werd besproken in onderdeel 'A6. Houtskelet'.

Productie (zie Fig.79)

Vurenhout is het hout van de fijnspar. Het vurenhout in wand D is afkomstig van fijnsparren uit de Belgische Eifel⁵⁷⁹. Het bewerkingsproces van deze sparren tot constructiehout lijkt op het proces dat werd beschreven in A6, maar verschilt in enkele onderdelen. De productie berust op **gemechaniseerd transport** (vellers, forwarders, tractors en vrachtwagens op diesel) en **elektriciteit** en **water** voor de productielijn in de fabriek. Net zoals het meeste constructiehout werd ook dit vuren behandeld met een impregneermiddel. Zagerij Hoffmann maakt gebruik van het product **Sarpeco 9 Plus**⁵⁸⁰.

Moderne bosbouw voor constructiehout werd al besproken in onderdeel 'A6. Houtskelet', alsook het vellen van de fijnspar. Wanneer de stammen in de houtfabriek aankwamen werden ze om te beginnen ontschorst⁵⁸¹. Vervolgens werd er een driedimensionale scan gemaakt van de ontschorste stammen, waarmee software het optimale zaagprofiel kon bepalen, rekening houdend met het kern- en spinthout. Afhankelijk van dit profiel werden de stammen ingekort en op lengte gesorteerd. Na deze 'rondhoutbewerking' werden de stronken in de

573. Dit houdt in dat er op jaarbasis geen positieve vochtbalans mag zijn in de wand.

574. Deschepper 2022

575. De afstand tussen deze boerderij en de werf bedraagt 3,3km.

576. Om uit te sluiten dat het stro na verloop van tijd zou rotten dient het vochtgehalte van de stromuren gemiddeld rond de 15% relatieve vochtigheid te blijven (Architectengroep Barchi 2016, p47).

577. Deschepper 2022

578. De buitenkant was al min of meer vlak door het gebruik van de tijdelijke bekistingsplanken.

Vuren geïmpregneerd*

L x H x B [mm]	nvtx60x180
ρ** [kg/m ³]	450
Treksterkte [N/mm ²]	60
Druksterkte [N/mm ²]	45
λ*** [W/mK]	~ 0,25
c*** [J/kgK]	~ 1700

* Alle waarden werden bekomen uit (Belgian Woodforum 2022).

** Bij vochtgehalte van 15%.

*** Waarde uit (Ashby 2013)

579. Hoffmann Trade ag z.d.

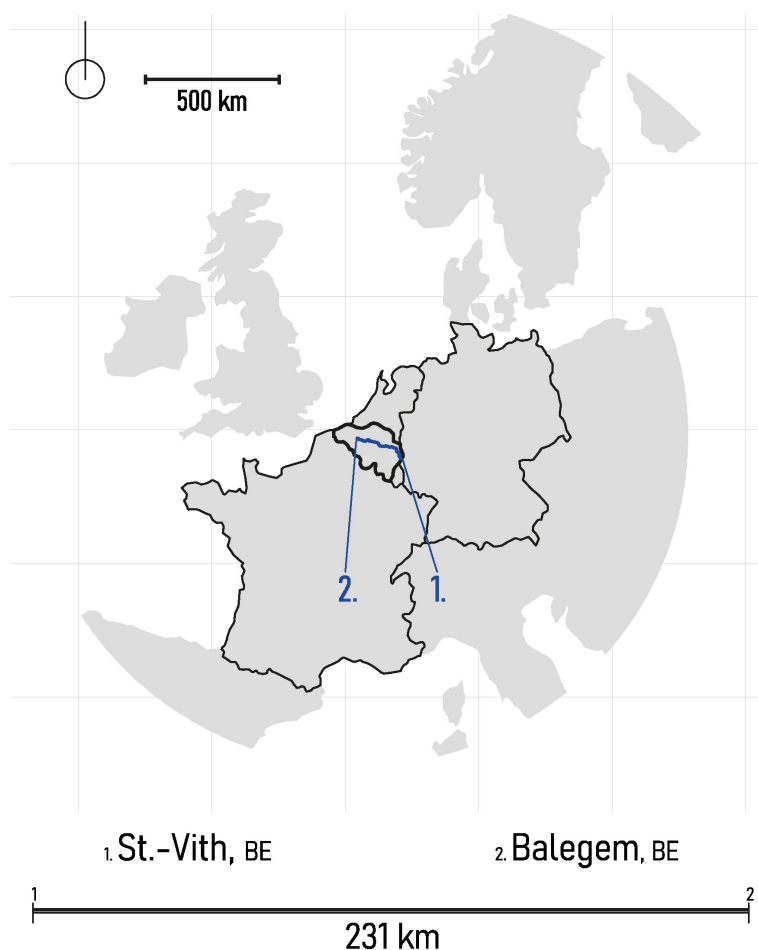
580. Sarpeco 9 Plus bestaat uit een met water verdunde mengeling van 2 fungicides (1,1% propiconazool en 1,1% febuconazool), een middel tegen blauw-schimmel (1% IPBC) en een insecticide (2% permethrine) (BUTgb 2014, p2).

581. Zie onderdeel 'A6. Houtskelet: productie'.

vooraf bepaalde secties gezaagd. Het zagen van het kernhout gebeurde met een 'kanter-bandzaag', het zagen van zijkantplanken gebeurde op de 'rechtkantbank'. De gezaagde secties werden vervolgens haaks afgekort. De kwaliteit van het constructiehout werd automatisch gecontroleerd door een 'precigrader'⁵⁸², op deze manier werd het vurenhout gesorteerd naar de sterkteklasse C24.

Bij de actieve impregnatie werd het gezaagde en gestapelde vurenhout in een waterachtige oplossing ondergedompeld. De sterk verdunde Sarpeco 9 Plus-oplossing trok op die manier in de oppervlakte van het hout en vormde zo een bescherm laag⁵⁸³. De duur van de onderdompeling hing af van de gewenste beschermingsgraad⁵⁸⁴. Sarpeco 9 Plus is een kleurloos impregneermiddel waardoor het vurenhout zijn tekening behield. Na de impregnatie werd het hout gedroogd in een afgesloten droogkamer⁵⁸⁵ tot een vochtgehalte van 15-20%⁵⁸⁶. Hierbij werd het hout compact maar geventileerd opgestapeld en belast met gewichten, waardoor torsies door het drogen werden vermeden. Na het drogen werden de balken geschaafd, waardoor gladde oppervlakken en de finale houtafmetingen werden bekomen.

Op onderstaande kaart is het transport van het vurenhout voorgesteld vanuit St.-Vith.



582. Een precigrader is een compact onderdeel van de productielijn die de kwaliteit (sterkte) van gezaagd hout controleert. Deze controle wordt uitgevoerd door het meten van het gewicht en het volume van een gezaagd stuk, en de resonantie ervan, wat gebeurt door middel van een het kops aantikken van het hout met een hamer.

583. In die zin is het belangrijk dat zgn. 'ondergedompeld' hout niet meer wordt verzaagd na de behandeling, tenzij het zaagoppervlak opnieuw wordt beschermd.

584. De procedure van zagerij Hoffmann kwam overeen met een 'beschermingsgraad 2:' voor hout dat binnen verwerkt wordt, maar weliswaar met vochtigheid in contact kan komen (Hoffmann Trade ag z.d.).

Fig.76:
Transport: Vurenhout

De vette lijn duidt op transport met zware voertuigen.

585. Eerst werd de kamerlucht verwarmd en de luchtvochtigheid opgedreven door beneveling. Tijdens het droogproces werd de vochtige lucht afgevoerd en met verse, droge lucht vermeng, waarbij het vocht uit het hout aan het oppervlak werd opgenomen en mee afgevoerd (Hoffmann Trade ag z.d.). Het is niet bekend hoe lang deze droging duurt.

586. Berge 2009, p171

De lage milieuimpact van het natuurproduct hout wordt ook bij de vurenhouten stijlen in wand D gedeeltelijk verhoogd door het drogen in een verwarmde en geventileerde droogkamer en de actieve impregnatie met synthetische middelen, waarvan de impact op het biologisch afbreekbare karakter van het materiaal niet gekend is⁵⁸⁷. Het blijft echter zo dat er inherent minder energie wordt verbruikt om constructiehout te produceren, dan voor de andere bouwmaterialen in dragende toepassingen. Bovendien laat hout geen afval na: alle bijproducten zoals schors, zaagsel en haksel worden zinvol hergebruikt. In het onderdeel 'Duurzaamheidsevaluatie' wordt ingegaan op de het vermogen van bomen om CO₂ te capteren. Bovendien werd dit hout 'lokaal' gewonnen, met een relatief lage transport-energie tot gevolg.

D7. Rietmat

Algemeen

De rietmatten die langs de binnenkant op de houten stijl werden geniet dienen als ondergrond voor de binnenpleister, aangezien deze niet hecht op hout. Het betreft een **Ecomat Rietrol**, geproduceerd door Ecomat⁵⁸⁸. De mat is gemaakt van 5 - 10mm dikke riethalmen, die per stengel om de 100 mm samengebonden zijn met 2 gegalvaniseerde staaldraden (0,45mm en 0,7mm dikte). De gebruikte matten bestonden uit halmen van 1000mm lang en waren zelf 5000mm lang, en werden op maat afgeknipt alvorens ze op het houtskelet werden bevestigd.

Informatie over de exacte materialen voor de rietmat is niet beschikbaar, in wat volgt worden dus generieke productieprocessen besproken. Het is tevens niet bekend hoe de mat werd geweven, al gebeurt dit allicht in een geautomatiseerd proces. Verder dient te worden opgemerkt dat de productie van gegalvaniseerde staaldraad een energie-intensief proces met een bijhorende significante milieuimpact is, maar de hoeveel draad in wand D zeer beperkt blijft.

Productie, gegalvaniseerde staaldraad (Fig.80)

Het productieproces van gegalvaniseerde staaldraad werd besproken in onderdeel 'A7. Wilgenmat: productie, gegalvaniseerde staaldraad'.

Productie, riethalmen (zie Fig.80)

Riet is een grassoort die gedijt in ondiep en stilstaand of langzaam stromend water. De plant groeit zeer snel, tot een hoogte van 4m. Doordat hij met zijn wortels en onderste deel van de halm in water groeit, is de plant geëvolueerd om vocht te weerstaan⁵⁸⁹, en kennen de rietmatten een hoge rot- en schimmelweerstand. Riet vereist geen bemesting of onkruidbestrijding. Integendeel, wild riet verplaatst de rest van de oevervegetatie en moet daarom worden ingedijkt door menselijke ingrepen. Zodoende is rietbeheer niet alleen economisch maar ook milieuvriendelijk⁵⁹⁰. Het riet wordt geoogst in de winter, wanneer het waterpeil laag genoeg staat of het water is bevroren, met behulp van een speciaal ontwikkeld landbouwvoertuig dat lijkt op een maaidorser. Na de oogst worden de halmen verzameld, worden de rietpluimen verwijderd en de stengels gedroogd. In West-Europa is de grootschalige cultivering van riet bijna onbestaande geworden als gevolg van het droogzetten van het land. Daarom wordt de grondstof tegenwoordig ingevoerd uit Polen, Bulgarije en Roemenië⁵⁹¹.

587. Door de verduurzaming die gepaard gaat met de impregnatie, en de oordeelkundige constructie van de wand, zouden de stijlen echter wel in aanmerking kunnen komen voor hergebruik wanneer wand D wordt afgebroken.

Ecomat Rietrol*

L x H x B [mm]	5000x1000x~10
ρ* [kg/m ²]	~ 1,6
Treksterkte [N/mm ²]	~
Druksterkte [N/mm ²]	7,5
λ [W/mK]	nvt
c [J/kgK]	nvt

* Alle waarden werden bekomen uit (Ecomat z.d.).

- 588. Ecomat 2022
- 589. Ashby 2013, p335
- 590. Ecomat 2022
- 591. Berge 2009, p341

Fig.77:
D1. Gekleurde kalkpleister
Flowchart productie

Percentages worden uitgedrukt in volumedelen van de aangebrachte pleister.

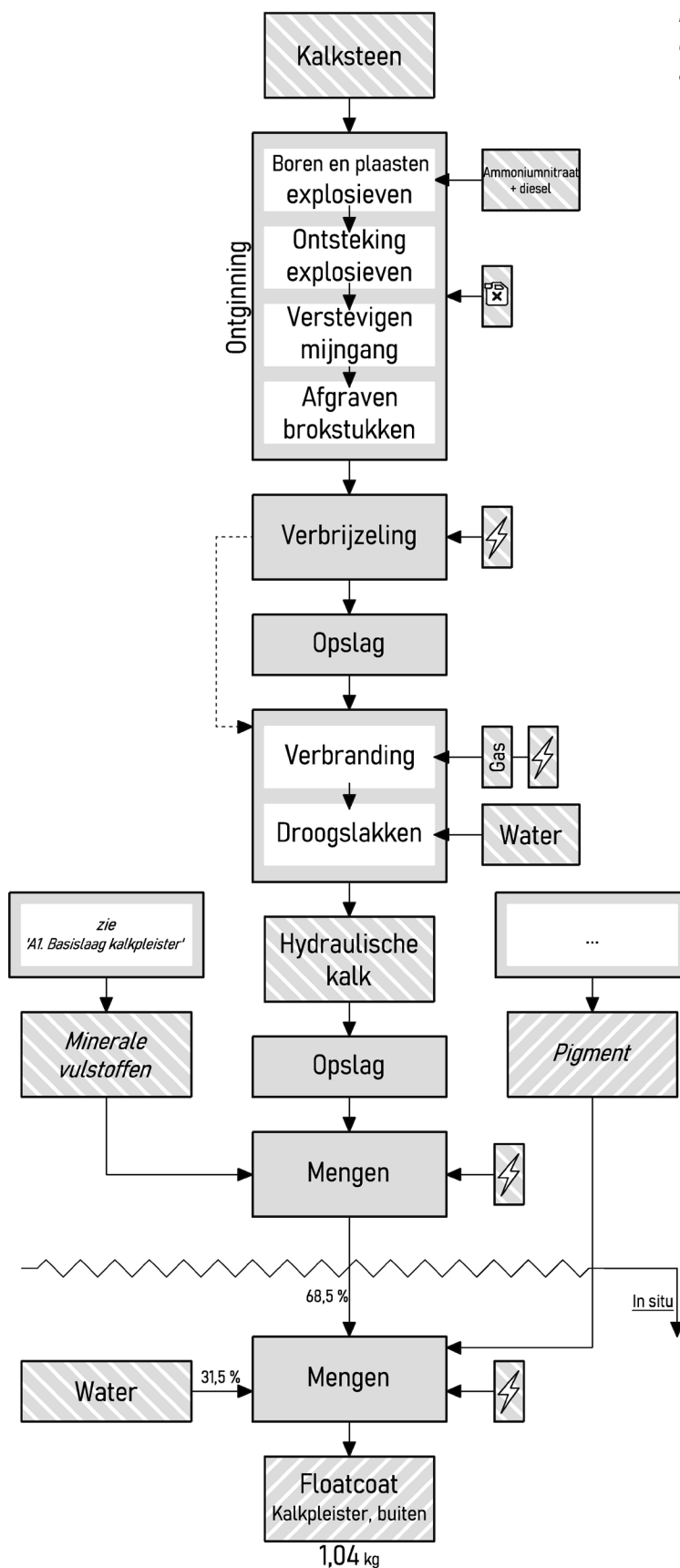


Fig.78:
D3. Basis traskalkpleister
Flowchart productie

Percentages worden uitgedrukt in volumedelen van de aangebrachte pleister.

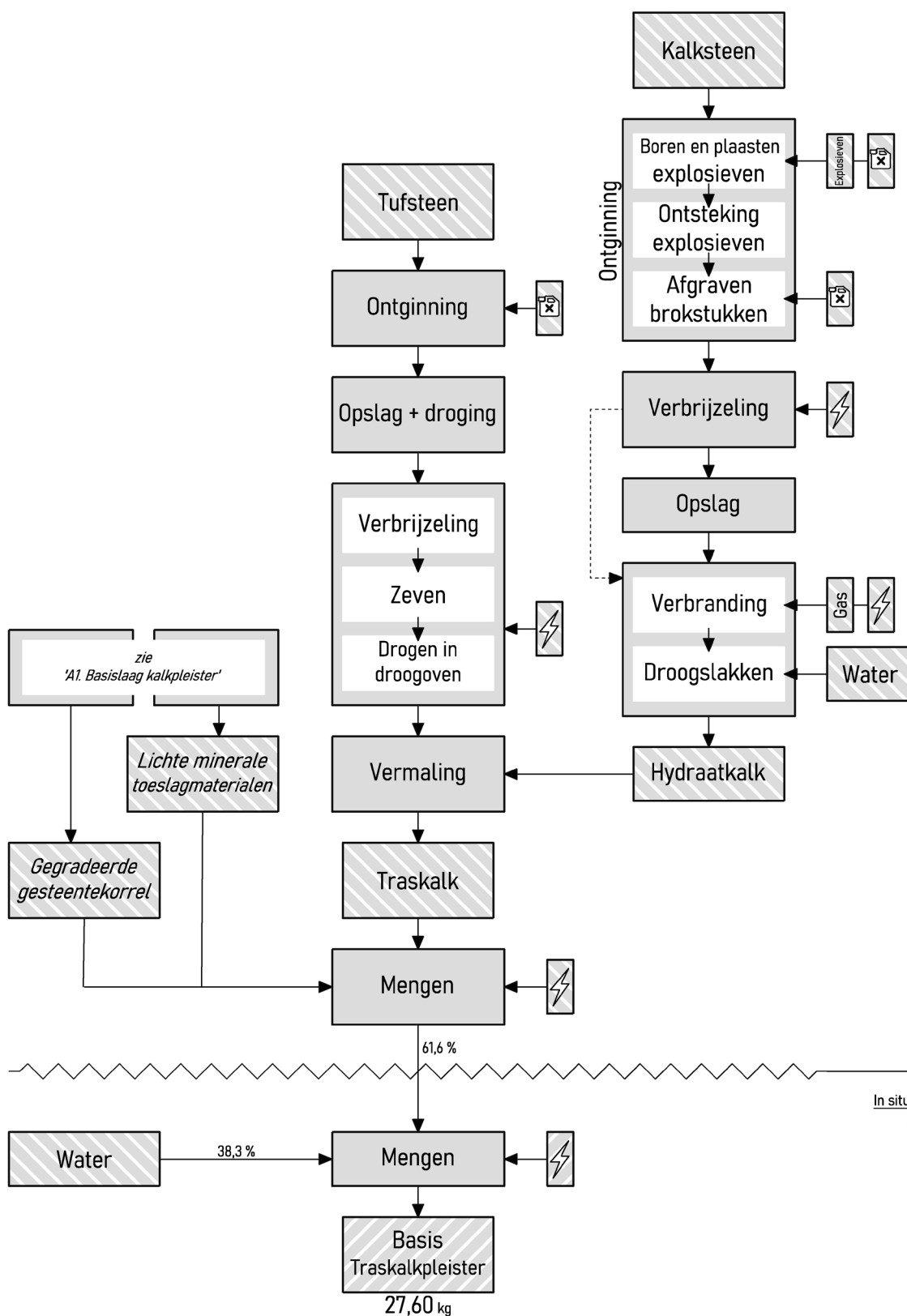


Fig.79:
D6. Vuren geïmpregneerd
Flowchart productie

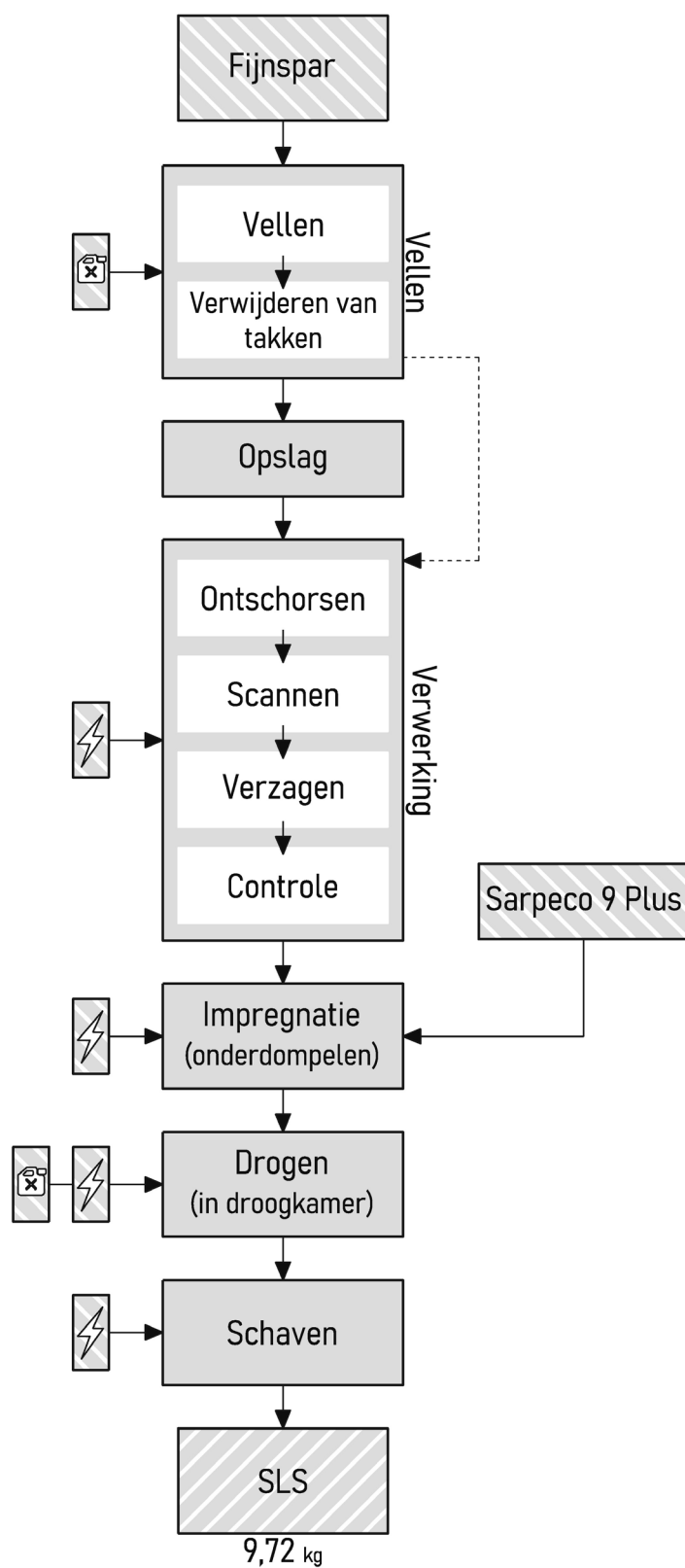
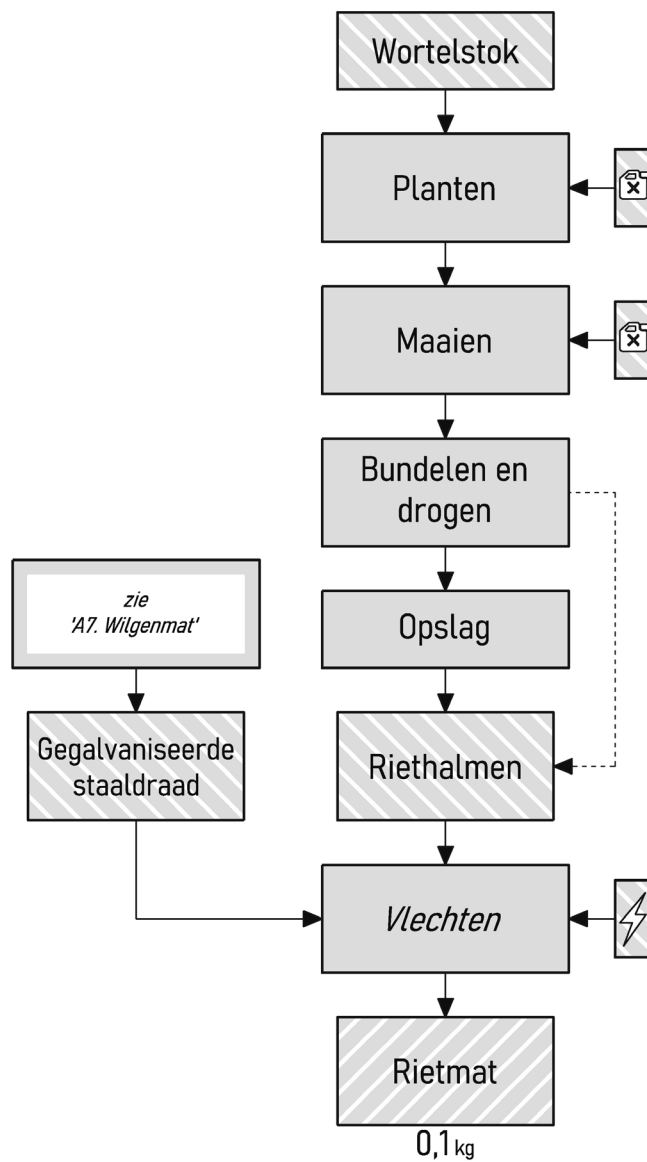


Fig.80:
D7. Rietmat
Flowchart productie



Recapitulatie

De horizontale snedes van wanden A, B, C en D laten elk een opbouw zien die dichter aanleunt bij die van een vakwerkwand dan bij de in de Lage Landen alom verspreide bakstenen spouwmuur. Dit onderscheid is duidelijk op vlak van elk van de 3 'basisfuncties' van een wand: dragen, isoleren en beschermen. De draagconstructies van de beschouwde wanden bestaan uit afzonderlijke onderdelen die samen werden gevoegd tot een skelet⁵⁹². Tussen – en soms ook rondom – de structuur zit een scheidende en isolerende massa. De wand – en daarmee ook het interieur – wordt beschermd tegen de buitenomgeving door een in theorie perfect lucht- en waterdichte barrière die aan de wand ophangt. In vergelijking met de 4-lagige spouwmuurconstructie⁵⁹³ zijn de besproken wanden compact en getuigen ze van een efficiënter materiaalgebruik, wat overigens een eigenschap is van iedere skeletstructuur. Dit materiaalgebruik stond centraal in de selectie en kwalitatieve beschrijving van de cases. Elk van de 4 wanden werd geselecteerd door hun opbouw die vrijwel enkel bestaat uit geo- en biogebaseerde materialen⁵⁹⁴. Het gebruik van deze materialen maakt de wandopbouw complexer. Samen bestaan de 4 voltooide wanden uit 32 verschillende materialen⁵⁹⁵, of gemiddeld 8 per wand tegenover 6 voor de spouwmuur⁵⁹⁶. Dit iets hoger aantal is te wijten aan inherente materiaaleigenschappen die het moeilijker maken vele geo- en biomaterialen (onderling) te verenigen tot een wand die voldoet aan de 3 basisfuncties. Een beschermende kalkpleisterlaag kan bijvoorbeeld niet zonder meer op een isolerende strobaal of dragende houtstijl worden gezet, maar moet in verschillende lagen worden aangebracht⁵⁹⁷. De eenvoud van een spouwmuur verdwijnt wanneer materialen worden gebruikt die veel gevoeliger zijn en een tijdrovende behandeling vereisen.

Een horizontale snede van 1m² wand blijft echter slecht een tweedimensionale tekening van een verzameling materialen, en zegt weinig over de overige 'dimensies' van een gebouwcomponent: de grondstoffen, de fabricage, het transport, de constructiewijze, het gebruik, de esthetiek, het onderhoud, de kostprijs, de levensduur, de afbraak, etc. Door met andere woorden zijn hele levensduur te betrekken in een analyse kan de multidimensionaliteit van een eenvoudige buitenwand worden uitgebreid met nog een reeks begrippen, en wordt 'het verhaal van 4 moderne buitenwanden' complexer en daarmee onvermijdelijk subjectiever, maar ook meer betekenisvol. De snedes laten de complexe opbouw zien van de geo- en biogebaseerde wand en in welke mate hij daarmee verschilt van de spouwmuur. Wat de overige dimensies echter laten zien is dat het verhaal nóg complexer is, maar tegelijk ook dat de 4 wanden in werkelijkheid dichter aanleunen bij de spouwmuur dan bij de vakwerkwand. De voorgaande kwalitatieve bespreking ging in op de gebruikte grondstoffen, de productieprocessen, het materiaaltransport en de constructiewijzen achter de m² wandopbouw. Hierdoor werd duidelijk dat het overgrote deel van de grondstoffen voor moderne geo- en bioconstructie nog dezelfde zijn als die van het vernaculaire bouwen (zandsoorten, klei- en leemgronden, stro, vlas, hennep, riet, meerdere houtsoorten en takken, kalksteen en natuursteen, en – uiteraard – water!), wat de reden is waarom deze familie van bouwtechnieken verwant blijft met hun vernaculaire voorgangers. Maar, de weg – en dit mag gerust ook letterlijk worden genomen

592. Wand B is een natuurlijk een halve uitzondering in dit opzicht, aangezien de wand werd gebouwd 'op' een bestaande en dragende baksteenmuur. De kalkhennep, en daarmee ook de buitenpleister, worden evenveel in niet verwaarloosbare mate versterkt door de houtstijlen.

593. Met als 4 lagen: de binnenpleister, het dragende binnen-spouwblad, het isolatiemateriaal en de combinatie van luchtspouw en buitenspouwblad.

594. Enkel het gebruik van wit cement in wand C vormt hier een uitzondering op.

595. Zonder bevestigingsmiddel erbij gerekend. Bij dit aantal zijn echter wel al 3 materialen gerekend die nog niet werden aangebracht (een leemfinish in wand A en een leembasis en -finish in wand D).

596. Binnenpleister, snel-bouwsteen, isolatiemateriaal, gevelsteen, metselmortel en voegmortel.

597. Verschillende lagen die gekarakteriseerd worden door een (licht) verschil in dikte, samenstelling en manier van aanbrengen.

– die bronmaterialen afleggen van hun natuurlijke staat tot in de wand is fundamenteel gewijzigd. De moderne productieprocessen die van natuurlijke materialen⁵⁹⁸ natuurlijke *bouwmaterialen* maken, zijn meestal uitgebreid, gecommmercialiseerd en geperfectioneerd naar opbrengst en sterkte van het eindproduct, wat vaak inhoudt dat materialen worden gewijzigd in hun samenstelling. Tegelijkertijd is de productie van bouwmaterialen een sterk gecentraliseerd gegeven geworden, wat voor de 4 wanden betekende dat de winning van grondstoffen, de verwerking tot bouwmaterialen (die soms op meerdere locaties gebeurde), en de werf zich op geheel andere plekken afspeelde. Zo bedroeg tussen de 4 wanden de minimum transportafstand voor de dragende functie (het houtskelet) 231km, met een vrachtwagen. Het materiaal voor de beschermende functie (kalkpleister) werd in totaal minstens over 208km vervoerd, waarvan 114km met een vrachtwagen. Enkel de stobalen en de wilgentakken, die de isolerende functie van wand D verzekerden, werden echt lokaal geproduceerd. Vernaculair bouwen werd gekenmerkt door het gebruik van lokale en relatief weinig bewerkte grondstoffen met lage vervatte energie. Dit geldt dus niet voor de hedendaagse geo- en biogebaseerde constructie.

Een aantal bemerkingen moeten worden gemaakt bij het lezen van de caseselectie als een vervolg op deel 1. Ten eerste zijn beide delen anders opgevat. Deel 1 is een veralgemenende bloemlezing van bouwtechnieken die is gebaseerd op secundaire bronnen. Het voorgaande deel is een beschrijving van concrete en hedendaagse cases die werd opgesteld met primaire bronnen⁵⁹⁹. Hoe vroeger werd gebouwd kan dus worden vergeleken met hoe dit vandaag gebeurt, gebaseerd op deze tweeledige structuur, maar deze vergelijking kent wel zijn beperkingen. Niet alle pré-industriële constructiewijzen werden besproken in deel 1, en 4 moderne cases vormen een beperkte representatie van het hedendaagse geo- en biobouwen⁶⁰⁰. Ten tweede worden de wandopbouwen op een vrij kritische manier beoordeeld. Hoewel er inderdaad bemerkingen kunnen worden gemaakt bij het ecologisch imago van de gebruikte materialen, neemt dat niet weg dat de besproken productieprocessen op milieutechnisch gebied vaak toch veel beter scoren dan die van conventionele bouwmaterialen. Indien de caseselectie leest als een verhaal van 2 negatieven, moet worden bedacht dat datgene wat minder negatief is, meer positief is dan het andere.

Verder werden tijdens het onderzoek een aantal algemene tendensen⁶⁰¹ opgemerkt:

- » De meeste materialen zijn in se na afbraak ofwel herbruikbaar, ofwel gemakkelijk te recyclen, ofwel te storten in de natuur⁶⁰². Dit is een waardevolle eigenschap waarmee materialen, als commerciële producten, dan ook worden aangeprezen. Na toepassing in de wanden wordt dit echter vaak teniet gedaan. Zo werden de pleisterlagen van wanden A en D versterkt met glasvezel wapeningsnetten. Met name de leem- en hydraatkalkpleisters zijn in theorie volledig te recupereren, maar verliezen deze mogelijkheid volledig op deze manier. Hetzelfde geldt onder meer voor de houtvezelplaat A4, en de kalkcementpleister C1.

598. In deze context is het begrip 'natuurlijk materiaal' uiteraard een pleonasme; elk materiaal was ooit afkomstig uit de natuur. Het onderscheid tussen 'natuurlijk materiaal' en 'natuurlijk bouw materiaal' vormt echter de kern van het betoog.

599. Enerzijds werden de 4 woningen bezocht, anderzijds werd informatie vergaard bij de eigenaars, aannemers en materiaalverdelers.

600. Zie ook 'Deel 2: Deel 2: Aarde als modern bouw materiaal, een terugkeer naar vroeger?'. Verder werden er enkel houtskeletwanden besproken. Hoewel dit zeldzamer is in België, worden geomaterialen ook in dragende toepassingen gebruikt.

601. Hierbij moet opnieuw de kanttekening worden gemaakt dat tendensen die zich in 4 cases manifesteren niet noodzakelijk algemeen geldig zijn.

602. Elk van deze operaties zou een voorzichtige en daarmee tijdsintensieve demontage van de wand vragen, en zouden daarmee misschien hoe dan ook niet economisch zijn.

- » De geo- en biogebaseerde constructietechnieken lenen zich gemakkelijk tot een vorm van zelfbouw. Enerzijds gingen de eigenaars van de 4 wanden allemaal zeer bewust om met materialiteit⁶⁰³, maar anderzijds was de constructie van de wanden ook relatief arbeidsintensief, waardoor kon worden bespaard op arbeidskosten door zelf aan de slag te gaan. Vele wandonderdelen zijn gebaseerd op aannemelijke en eenvoudige bouwmethodes die zelfhulp mogelijk maken. Daarbij valt op dat de draagconstructie van de wand in alle gevallen wel werd uitbesteed, wat ook geldt voor de afwerkingslagen⁶⁰⁴. Naast de bescherming van de wand bleek de esthetiek dan ook in elke case een belangrijk gegeven te zijn, waarvoor graag professionele hulp werd ingeschakeld.
- » De niet-dragende houtskeletten met geo- en bio invullingen zijn gemakkelijk te verbouwen zonder invloed op de rest van de constructie. In de gebruiksfase hebben de wanden echter als nadeel dat er niet zomaar zaken aan kunnen worden bevestigd.
- » De mate waarin een wand langdurig kan voldoen aan haar beschermende functie lijkt omgekeerd evenredig met de mate waarin haar samenstellende delen 'natuurlijk' kunnen zijn, en recht evenredig met de milieuimpact van de fabricage van de afwerkingslagen. Bij elke wand bestond de buitenste afwerkingslaag immers uit verschillende hydraulisch reactieve kalkmengsels. De kalkgebaseerde beschermingslaag van een geo- en biogebaseerde wand benadert daarmee de eigenschappen van een cement. Op een optimum tussen 'durability' en 'sustainability' bevindt zich de combinatie van hydraatkalk met het natuurlijk puzzolaan tras. Pleisters en kalkhennep die met dit bindmiddel werden aangemaakt behoren daarmee wel degelijk tot de meest zuivere voorbeelden van geo- en biogebaseerde constructie.

603. Aangezien geo- en bioconstructie zich nog steeds in de marge van de markt bevindt, wordt dit nog enkel gebruikt door opdrachtgevers met dit profiel.

604. De draagconstructie van wand B was uiteraard al aanwezig in de vorm van de baksteenmuur, en ook de afwerking in kalkpleister werd hier zelf gedaan. Het secundaire houtskelet van wand D werd tevens door de eigenaars zelf geplaatst.

Duurzaamheidevaluatie

In 2021 publiceerde de Europese raad en het Europese parlement een heruitgegeven verordening over het 'duurzaam gebruik van natuurlijke grondstoffen'⁶⁰⁵, waarin wordt gesteld dat gebouwen ontworpen, gebouwd en afgebroken moeten worden op een manier die het volgende garandeert:

- » Bij de bouw van het gebouw moeten milieuvriendelijke grondstoffen en secundaire bouwmaterialen worden gebruikt.
- » Het gebouw moet duurzaam zijn.
- » Het gebouw, de bouwmaterialen en de bouwelementen moeten recycleerbaar zijn na afbraak.

Het 2e principe gaat over een functionele gebruikerseis die wordt gesteld aan een gebouw(component) gedurende haar nuttige levensduur en duidt daarmee op 'durability'. Het 1e en het 3e principe gaan over het beperken van de impact van dit gebouw op het milieu, voor en na haar levensduur, en gaan dus over de milieutechnische 'sustainability'. Deze tweeledigheid van het begrip 'duurzaamheid' werd al besproken in het onderdeel 'Vraagstelling en methodiek', en is het uitgangspunt om een evaluatie te kunnen maken van de duurzaamheid van de 4 geo- en biogebaseerde wanden. In het vorige deel werd op een beschrijvende manier voornamelijk aan het 1e principe beantwoord, waarbij duidelijk werd dat productieprocessen er in de meeste gevallen voor zorgen dat secundaire bouwmaterialen moeten inboeten aan het milieuvriendelijke gehalte van hun grondstoffen. In mindere mate werd een inschatting gemaakt van de 2e en 3e stelling.

Om ergens in absolute termen over te kunnen spreken is er naast een kwalitatief onderzoek ook een kwantitatieve becijfering nodig. Het kwantificeren van een abstract begrip als duurzaamheid is een moeilijke oefening die berust op keuzes en afbakening. Het zijn immers enkel grootheden die kunnen worden becijferd en in een kwantitatieve evaluatie worden dus zowel de 'durability' als 'sustainability' van een wand bekeken als verzameling van zulke grootheden. Dit houdt onvermijdelijk een vereenvoudiging in van de multidimensionale werkelijkheid, die niet te berekenen is, maar maakt wel vergelijking mogelijk tussen de 4 wanden en een voorgestelde referentiewand Z: de bakstenen spouwmuur.

De 'durability' van een wand hangt af van zijn vermogen om gedurende geruime tijd te voldoen aan de 3 basisfuncties. Op de tijdsdimensie wordt in deze beoordeling niet ingegaan⁶⁰⁶, aangezien 3 van de 4 wanden een onvoldoende ouderdom hebben maar ook omdat het onderzoeken van degradatiefenomenen in een wand voorbij gaat aan de opzet van de scriptie. Verder wordt geen berekening gemaakt van de beschermende, noch van de dragende functie, maar volstaat de vaststelling dat de wanden 'stevig, en water- en winddicht' zijn. Het is de isolerende functie die het meest eenvoudig te berekenen is maar meteen ook één van de belangrijkste vereisten is waaraan een buitenwand dient te voldoen. Elke woning die in Vlaanderen wordt gebouwd, is verplicht te voldoen aan de energieprestatieregelgeving (EPB), die eisen oplegt aan het isolatiepeil van de gebouwschil. De U-waarde [$\text{W/m}^2\text{K}$] drukt de thermische isolatiekwaliteit uit van een wand en mag sinds 2018 ten hoogste 0,24 bedragen⁶⁰⁷. Verder is het belangrijk dat een gelijkaardige U-waarde dient als benchmark, zodat een vergelijking van de 'sustainability' van de 4 wanden terecht is.

605. Europees Parlement en Europese Raad 2021

606. Voor wand C werd dit eerder wel beperkt besproken.

607. Het thermische isolatievermogen dat wordt uitgedrukt als een U-waarde [$\text{W/m}^2\text{K}$] is een eerste vereiste voor energie efficiënte verwarming en behaaglijke oppervlaktetemperaturen in het interieur. Een andere zeer belangrijke parameter van de isolerende functie van een wand is echter haar warmteretentie capaciteit [$\text{kJ/m}^2\text{K}$], die interieurs beschermt tegen oververhitting of te snel afkoelen bij schommelende buitentemperaturen. Het isolatievermogen hangt enkel af van de van de mate waarin materialen warmte geleiden (λ - waarde) en hun dikte, maar de thermische retentiecapaciteit hangt af van de warmtecapaciteit c , de massadichtheid ρ en de dikte van een materiaal. De thermisch dempende werking van een buitenwand – de verhouding tussen zijn thermische isolatie- en retentie-eigenschappen – is de beste indicator van de mate waarin de wand voldoet aan zijn isolerende basisfunctie (Volhard 2015, pp 199-208). In een koel gematigd klimaat – zoals dat van de Lage Landen – heeft de thermische isolatie de grootste invloed op deze dempende werking. Daarom wordt de U- waarde als vrij

Deze milieutechnische 'sustainability' wordt geëvalueerd door middel van een berekening van de ingebedde koolstof in elke wand. De ingebedde koolstof of 'embodied carbon', waarnaar vanaf nu zal worden gerefereerd als 'EC', is de hoeveelheid CO₂ die direct of indirect wordt geproduceerd doorheen de levenscyclus van een bouw materiaal. Dit houdt het totale energieverbruik in, omgerekend naar CO₂ emissies, en de bijkomende niet aan brandstof gerelateerde CO₂ uitstoot voor de extractie van grondstoffen, het verwerken van deze stoffen tot bouwmaterialen, het bijhorende transport, het installeren van de bouwmaterialen, het onderhoud van de gebouwcomponenten en de eindelevensduur behandeling⁶⁰⁸. Terecht kan de vraag worden gesteld waarom een EC waarde wordt gekozen als representatieve indicator voor de 'sustainability' van een wand⁶⁰⁹. De wereldwijde klimaatverandering is waarschijnlijk de grootste bedreiging waarmee de mens vandaag wordt geconfronteerd. De opwarming van het klimaat wordt veroorzaakt door een breed scala aan broeikasgassen in de atmosfeer, maar meer dan de helft van alle uitgestoten broeikasgassen is koolstofdioxide⁶¹⁰. De mate waarin een buitenwand bijdraagt aan de globale CO₂ productie zegt dus zeer veel over haar 'negatieve impact op de toekomst', en EC is daarmee een zeer goede parameter voor exploratief onderzoek naar de milieutechnische duurzaamheid van een product.

In wat volgt, wordt dus eerst een basis voor de vergelijking gecreëerd door de U-waarde van de 4 wanden en de referentiewand te verifiëren. Vervolgens wordt voor elke wand een EC berekening gemaakt.

Durability: themisch isolatievermogen

Wanden A, B, C en D zijn voor het grootste deel opgebouwd uit lichte materialen die een lage warmtegeleidingscoëfficiënt λ hebben. Er wordt dus verwacht dat het thermisch isolatievermogen van de wanden hoog zal liggen, en de U-waarde laag. De U-waarde van een gebouwcomponent wordt berekend als de inverse van de som van de afzonderlijke warmteweerstanden van de samenstellende delen van het component.

$$U = \left(\frac{1}{a_e} + \frac{1}{\sum \frac{d_i}{\lambda_i}} + \frac{1}{a_i} \right)^{-1} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

Met:

- » De warmte-overgangscoëfficiënten voor het binnen- en buitenoppervlak
 $a_i, a_e \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$
- » De dikte van het samenstellend deel i
 $d_i \quad [\text{m}]$
- » De warmtegeleidingscoëfficiënt van deel i
 $\lambda_i \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$

eenvoudige fysische parameter geverifieerd in deze oefening.

608. Hammond en Jones 2011, voorwoord

609. Zie ook onderdeel 'Sustainability: Embodied Carbon'.

610. Berge 2009, p31

Wand A

	d [m]	λ [W/mK]
A1. Basis kalkpleister	0,01	0,3
A3. Hechtalkpleister	0,004	0,32
A4. Houtvezelplaat	0,08	0,04
A5. Kalkhennep	0,235	0,054
A6. Houtskelet	0,235	0,25
A8. Basis leempleister	0,03	0,91
	0,36	

Wand B

	d [m]	λ [W/mK]
B1. Floatcoat	0,01	0,3
B2. Scratchcoat	0,02	0,3
B3. Houtskelet	0,14	0,25
B4. Kalkhennep	0,3	0,054
Baksteenwand	0,28	0,55*
B5. Scratchcoat	0,015	0,3
B6. Floacoat	0,05	0,3
B7. Finishing coat	0,01	0,3
	0,64	

* Waarde uit Ashby 2013, 528

Aldus worden de volgende resultaten bekomen:

- » Wand A: $U = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$
- » Wand B: $U = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$
- » Wand C: $U = 0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$
- » Wand D: $U = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$
- » Wand Z: $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$

Dat de U-waarden voor 3 van de 4 wanden gelijk zijn is toevallig maar dat ze allen (zeer) laag zijn (vergeleken met de wettelijke eis van $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$) is dat niet. Ook in vergelijking met de referentiewand Z zijn wanden A, B en D zeer goed isolerende elementen. Zoals reeds duidelijke werd bestaan de geo- en biowanden als het ware uit 1 massa aan isolerende materialen, waar deze functie in het geval van de spouwmuur slechts door 1 laag wordt verzekerd. Bij een voldoende dikke wand levert dit de bekomen hoge thermische isolatiecapaciteiten op. Wand D scoort iets minder goed, wat te wijten is aan de gevoelig hogere λ - waarde van de stroleem ten opzichte van de strobale en kalkhennep. Hierbij dient te worden opgemerkt dat – hoewel betrouwbare bronnen werden gebruikt⁶¹¹ – de werkelijke λ - waarde van de materialen allicht verschilt van diegene die in de berekening werden gebruikt. Uitgerekend bij deze materialen is de behandeling in situ immers van groot belang voor de uiteindelijke isolatiewaarde (het aandammen/persen van kalkhennep/strobale en de mengverhouding van stroleem).

Desondanks toont deze eenvoudige berekening 2 zaken aan. Ten eerste kan worden gesproken van wanden die voldoen aan hun isolerende basisfunctie, en in die zin functioneel duurzaam zijn. Ten tweede is het verschil in U-waarden aanvaardbaar om een terechte vergelijking te kunnen maken tussen de 4 wanden en de referentiewand.

Sustainability: Embodied Carbon berekening

Een buitenwand is als gebouwonderdeel op 2 manieren verantwoordelijk voor de productie van CO₂ : door 'energievervuiling' en 'materiële vervuiling'. Onder energievervuiling wordt hier de hoeveelheid CO₂ verstaan die wordt geproduceerd door het opwekken van de benodigde energie voor alle levensfasen die een materiaal doorloopt: van ontginning tot eindelevensduur. Het vervoer van zowel grondstoffen als eindproducten levert hier ook een grote bijdrage aan. De CO₂ - gerelateerde energievervuiling hangt

Wand C		
	d [m]	λ [W/mK]
C1. Kalkcementpleister	0,015	0,3
C2. Leemputz	0,01	0,3
C3. Stroleem	0,3	0,17
C4. Houtskelet	0,06	0,25
C4. Houtskelet	0,06	0,25
C2. Leemputz	0,01	0,3
C5. Leempleister	0,005	0,91*
	0,34	

* Waarde uit A8. Basis leempleister

Wand D		
	d [m]	λ [W/mK]
D1. Kalkpleister	0,008	0,3
D3. Traskalkpleister	0,04	0,39
D5. Strobale	0,36	0,052
D6. Houtskelet	0,36	0,25
Leempleister	0,03	0,91*
	0,435	

* Waarde uit A8. Basis leempleister

Wand Z		
	d [m]	λ [W/mK]
Gevelsteen	0,088	1,27
Luchtspouw	0,03	~
PUR-plaat	0,1	0,024
Snelbouwsteen	0,138	0,453
Gipspleister	0,012	0,52
	0,368	

611. De technische fiche voor A5 en B4, het werfbestek voor C3 en vakliteratuur voor D5.

rechtstreeks af van welke energievorm wordt aangewend en op welke manier deze vorm wordt opgewekt. Zo wordt transport over zee, land en lucht in de meeste gevallen aangedreven door een verbrandingsmotor, die door de verbranding van fossiele brandstoffen rechtstreeks CO₂ produceert. Vele fabrieksprocessen zijn dan weer gebaseerd op elektrische motoren. Elektriciteit wordt geproduceerd uit een combinatie van bronnen⁶¹², die sterk verschilt van land tot land. Zo is in 'Scandinavië' het gebruik van waterkracht heel gewoon, terwijl in Groot-Brittannië en West-Europa de belangrijkste bronnen nog steeds fossiele brandstoffen en kernenergie zijn⁶¹³. Materiële vervuiling heeft betrekking op de CO₂ die afkomstig is van het materiaal zelf en de bestanddelen ervan, wanneer het ontstaat, wordt verwerkt en gebruikt, en wanneer het vergaat⁶¹⁴. In tegenstelling tot de energievervuiling situeert de CO₂ – gerelateerde materiële vervuiling zich enkel in de productie- en afvalfase. De productie van kalk is een duidelijk voorbeeld van het verschil tussen de 2 soorten vervuilingen⁶¹⁵. Het calcineren van de kalk gebeurt onder hoge temperaturen, die worden opgewekt door het verbranden van aardgas. De CO₂ die vrijkomt bij deze verbranding is energievervuiling. In de calcinatiereactie zelf wordt kalksteen echter ook omgezet in calciumoxide en CO₂; wat de materiële vervuiling is van het proces. Berge (2009) schat dat beide vormen van vervuiling ongeveer de helft van de totale CO₂ productie inhouden⁶¹⁶. Indien de kalkoven zou worden verhit met elektriciteit die volledig wordt opgewekt in een waterkrachtcentrale, zou de energievervuiling in het verbrandingsproces verdwijnen maar de materiële vervuiling ongewijzigd blijven⁶¹⁷.

De materialen in een buitenwand kunnen daarentegen ook verantwoordelijk zijn voor een gunstige 'negatieve productie' of opname van CO₂. Tijdens de groei absorberen en binden planten door fotosynthese grote hoeveelheden CO₂ uit de lucht en dragen zij een hoeveelheid over aan de omringende grond. Bomen groeien door uit CO₂ en water koolwaterstoffen op te bouwen, met name cellulose en lignine, wat de bouwstenen zijn van hout⁶¹⁸. Op deze manier bevat 'elke kilo droge plantenmassa [...] ongeveer 0,5 kilo koolstof. Dit komt overeen met de vastlegging van 1,8 kilogram CO₂ uit de atmosfeer'⁶¹⁹. Hieruit mag echter niet zonder meer worden afgeleid dat de CO₂ voetafdruk van planten negatief; dat het produceren en gebruiken van biomaterialen CO₂ eerder absorbeert dan produceert. Dit koolstof krediet voor planten bestaat enkel echt als de materiaalcyclus wordt gesloten. Wanneer hout wordt gebruikt, moet een boom opnieuw worden aangeplant. Sterker nog, de groei van planten moet hetzelfde tempo volgen als de consumptie ervan⁶²⁰. Zolang voorraden niet even snel worden vervangen als ze worden gebruikt, blijft de CO₂ voetafdruk van hout (licht) positief⁶²¹. Plantaardige materialen zijn niet de enigste materialen die in staat zijn CO₂ te capteren. Minerale oxiden zoals magnesium- (MgO) en calciumoxide (CaO) komen van nature voor als silicaatgesteenten waarin koolstof gebonden is⁶²². Door deze afkomst zijn zulke oxiden in staat te reageren met CO₂ uit de atmosfeer, waardoor ze stabiele carbonaatverbindingen vormen die onder andere letterlijk worden gebruikt als bouwstenen. De eerder beschreven kalkcyclus is hier een bekend voorbeeld van⁶²³. In tegenstelling tot de organische stoffen, die CO₂ capteren tijdens hun groei en dit blijven opslagen tijdens de nuttige levensduur van een component, absorberen minerale stoffen dus tijdens hun toepassing

612. Deze combinatie houdt de volgende bronnen in: kern-energie, zonne-energie, wind- en waterkracht, biomassa, verbranding van fossiele brandstoffen, afvalverbranding, enz. Voor de productie van materialen ligt de benuttingsgraad van energie uit elektriciteit een stuk lager dan bij directe verbranding. Zo wordt bij het verbranden van aardgas en aardolie respectievelijk 55 en 75 g CO₂ geproduceerd per MJ aan energie die het verbrandingsproces oplevert. Voor elektriciteit van op het net ligt dit 110 g CO₂ / MJ (cijfers voor OESO-landen uit 2007) (Berge 2009, p30).

613. Berge 2009, p27

614. Zowel energie- als materiële vervuiling duiden in werkelijkheid op veel meer stoffen dan enkel CO₂. Zo veroorzaken fossiele brandstoffen ook een belangrijke uitstoot van zuren zoals zwaveldioxide (SO₂) en fotochemische oxidanten, zoals stikstofoxiden (NOX). Materiële vervuiling bestaat uit allerlei emissies, stofproductie en straling van materialen (Berge 2009, pp 29-31). Zoals eerder besproken wordt de keuze gemaakt voor CO₂ als indicator. Bijgevolg wordt vanaf hier het onderscheid niet meer gemaakt tussen 'vervuiling' en 'CO₂ – gerelateerde vervuiling'.

615. Zie onderdelen 'A1. Basislaag kalkpleister' en 'A5. Kalkhennep'.

616. Berge 2009, p34

617. Er kan nog steeds energievervuiling worden toegekend aan dit proces door de CO₂ productie in de bouw van de waterkrachtcentrale mee te rekenen, maar dit is een kwestie van systeemgrenzen. Verder is dit een hypothetisch voorbeeld. Een kalkoven op elektriciteit is allicht niet toepasbaar in werkelijkheid.

618. Ashby 2013, p124

619. Berge 2009, p34

620. Voor planten als hennep geldt deze voorwaarde en daar-

als bouw materiaal CO₂. Deze materialen mogen dus niet worden gezien als 'CO₂ verwijderaars', maar als materialen die 'tijd kopen' in de strijd tegen de opwarming van de aarde. Wanneer een gebouw vervalt na 50 of 100 jaar, en de materialen worden gestort zodat ze weggroten⁶²⁴, of worden verbrand, komt de gecapteerde koolstof immers terug vrij in de atmosfeer. Enkel hergebruik of recycling bieden een beter alternatief.

Zoals eerder aangevoerd, is CO₂ het meest geproduceerde broeikasgas en speelt de productie ervan daarmee een cruciale rol in de opwarming van de aarde. In 2020 was de constructie en uitbating van gebouwen verantwoordelijk voor 37 procent van de globale energie-gerelateerde CO₂ uitstoot, of zo'n 32 gigaton in één jaar⁶²⁵. Een statistiek uit 1997 toont dat op dat moment ongeveer 10 tot 20% van de totale uitstoot van broeikasgassen verband hielden met de gebruikte materialen in de levenscyclus van voor conventionele gebouwen met een levensduur van 50 jaar. In het geval van toenmalige lage-energiegebouwen, waar de energiebehoefte lager was en het materiaalgebruik hoger, kon dit aandeel al meer dan 50% bedragen⁶²⁶. 25 jaar later leggen nationale regelgevingen een pak strengere eisen op omtrent de energieprestatie van gebouwen, en neemt het materiaalgebruik aldus een groter aandeel in dan het operationeel energieverbruik in de milieupact van een gebouw doorheen haar levenscyclus. Geschat wordt dat de productie en het vervoer van bouwmaterialen verantwoordelijk is voor 7 tot 9% van alle broeikasgasuitstoot in West-Europa; de belangrijkste bijdragen worden geleverd door staal, cement, en kunststoffen⁶²⁷. Een kwantitatieve beoordeling van EC in een buitenwand is daarom van essentieel belang om deze milieueffecten deels vast te kunnen stellen en te vermijden in toekomstige constructies die gebaseerd zijn op gelijkaardige technieken en materialen.

Berekeningsmethodiek

Het onderstaande deel is gebaseerd op (Chung Lam en Trigaux 2021).

In 2012 werd door een team van Belgische onderzoeksinstituten⁶²⁸ een beoordelingsmethode voorgesteld die was ontwikkeld om de milieuprestaties van gebouwelementen te kunnen kwantificeren: het MMG (Milieugerelateerde Materiaalimpact van Gebouw(element)en). De doelstelling van het MMG is om de milieueffecten van elementen en gebouwen te berekenen tot een resultaat van zowel individuele 'milieupact indicatoren' en een geaggregeerde score. Zo biedt deze berekening een becijferd inzicht in de milieutechnische 'sustainability' van bouwmaterialen binnen de Belgische context, rekening houdend met de volledige levenscyclus van een gebouwonderdeel.

De input van de MMG berekening bestaat enerzijds uit een reeks generieke milieugegevens voor bouwmaterialen en -componenten. Deze gegevens zijn gebaseerd op de Zwitserse Ecoinvent-databank. Ecoinvent is een zeer uitgebreide en geverifieerde verzameling van LCI datasets⁶²⁹ van processen en materialen in Zwitserland en West-Europa. In deze datasets zijn gedocumenteerde onderliggende processen meestal zichtbaar (bv. elektriciteitsverbruik voor een productieproces) en aanpasbaar naar de Belgische context. Sinds 2020 bestaat de input van de berekening anderzijds ook uit specifieke milieugegevens van gevalideerde en geverifieerde B-EPD's⁶³⁰.

mee kan deze plant op een 'sustainable' manier worden geteeld. Wereldwijd worden bossen echter gekapt voor bouwmaterialen, brandstof, pulp, en loutere opruiming, in een veel hoger tempo dan ze worden heraanplant. Voor een gemiddelde boomsoort duurt het immers 80 jaar tot ze volgroeid is (Ashby 2013, p124).

621. Ashby 2013, p124

622. Berge 2009, p34

623. Zie onderdeel 'A5. Hydratkalk: productie, hydratkalk'.

624. Gecarbonateerde CO₂, of kalksteen (CaCO₃), zal niet weggroten wanneer het wordt gestort, maar in principe eenvoudigweg vervallen tot haar natuurlijke staat (niet rekening houdend met verontreinigingen). Ook hier is het verschil tussen biogene en minerale CO₂ captatie duidelijk.

625. United Nations Environment Programme 2021, p 15

626. Gielen 1997, geciteerd door Berge 2009, p33.

627. Kram 2001, geciteerd door Berge 2009, p33.

628. Het projectteam bestond uit VITO, KU Leuven (vakgroep Architectuur) en het WTCB - CSTC, en werkte in opdracht van OVAM (Chung Lam en Trigaux 2021, p5).

629. Een LCI, of Life Cycle Inventory, is een complete verzameling van milieutechnische gegevens van een proces of (bouw)materiaal.

630. B-EPD's bestaan uit gegevens van fabrikanten van bouwproducten die beschikbaar zijn op de Belgische markt of kunnen worden gebruikt in gebouwen op het Belgische grondgebied, en zijn beschikbaar in de Belgische B-EPD-databank.

Deel 3: Geo- en biogebaseerde wanden in kaart gebracht

Het idee van de m² wandopbouw werd ontleend aan het concept van de functionele eenheid (FE) in de MMG berekening. Een gebouwelement wordt steeds gedefinieerd als een functionele eenheid. Voor vlakvormige elementen zoals wanden of vloeren is dit de vierkante meter [m²], voor lijnvormige elementen zoals balken of kolommen is dit de meter [m]. Indien een berekening wordt gemaakt van een heel gebouw, wordt dit gebouw beschouwd als verzameling van functionele eenheden. Een vergelijking tussen verschillende gebouwcomponenten wordt enkel zinvol indien de functionele eenheden bepaalde vooropgestelde karakteristieken delen of hierin gelijkaardig zijn⁶³¹. Daarnaast kan de milieupact van een gebouwonderdeel enkel worden berekend indien de levensduur van dit onderdeel en haar samenstellende delen gekend is. Het MMG maakt gebruik van een standaard referentie-levensduur van 60 jaar voor woningen, kantoren, scholen en winkels en hun gebouwcomponenten. Op deze manier is de werkelijke nuttige levensduur van samenstellende materialen van invloed op de milieupact van het component⁶³². Ten slotte maakt de MMG gebruik van het concept van de levenscyclus van een materiaal. Deze term werd al meerdere malen aangehaald en verdient te worden uitgeklaard. In de Europese normen⁶³³ wordt de levenscyclus van een gebouw(onderdeel) in verschillende stadia onderverdeeld, elk met duidelijk afgebakende grenzen. De stadia worden in 4 verschillende modules gegroepeerd: A1-A3: Productiefase, A4-A5. Constructiefase, B1-B7. Gebruiksfase, en C1-C4. Eindelevensduurfase. Een 5e module (D. Voordelen en belastingen buiten de systeemgrenzen) gaat over het hergebruik van materialen maar wordt momenteel nog niet in de berekening toegepast. De basisregel van de berekening met modules is dat een milieupact wordt toegewezen aan het stadium waarin het zich voordoet.

Het resultaat van de MMG berekening wordt mede weergegeven als geheel van milieupact indicatoren. Deze indicatoren werden bepaald in overeenstemming met Europese LCA-normen en aanbevelingen⁶³⁴ betreffende milieu-indicatoren en impact-beoordelingsmethoden. De impactindicatoren zijn berekenbare waarden van milieueffecten die toe te schrijven zijn aan een gebouwelement. Sinds de actualisering van 2021 zijn de volgende 12 belangrijkste milieupact categorieën opgenomen in het MMG-beoordelingskader: klimaatverandering, ozonlaagaantasting, verzuring, vermesting, smogvorming, uitputting van abiotische grondstoffen, watergebruik, fijnstof emissie, ioniserende straling/ menselijke gezondheid, ecotoxiciteit (zoetwater), humane toxiciteit, en landgebruik gerelateerde impact/ bodemkwaliteit. De MMG berekening van een gebouwonderdeel kent aan 19 impactindicatoren, die binnen deze 12 categorieën vallen, een cijferwaarde toe en maakt daarmee een kwantitatieve inschatting van de milieupact van dat gebouwelement.

Aangezien voor dit onderzoek een berekening wordt gemaakt van de EC-waarde, wordt enkel gekeken naar het resultaat van de impactcategorie 'klimaatverandering'. Het resultaat voor deze impactcategorie wordt gegeven in [kg CO₂/ FE] of [kg CO₂/ m²], en bestaat uit 3 indicatoren: klimaatverandering – fossiel, klimaatverandering – biogeen, en klimaatverandering – landgebruik en verandering in landgebruik. Biogene CO₂ captatie wordt dus ook mee in rekening gebracht in de MMG berekening, in de productiefase. Daarom wordt ook rekening worden gehouden met de uitstoot van deze biogene koolstof in de atmosfeer aan het einde van de levenscyclus.

631. Zo werd voor dit onderzoek het thermisch isolatievermogen van de wanden als benchmark gezet voor de vergelijking van de 4 verschillende functionele eenheden.

632. Voor een materiaal dat elke 10 jaar moet vervangen worden, zal immers de productie gerelateerde milieupact vermenigvuldigd worden met 6 wanneer dit materiaal moet worden toegepast in een wand die 60 jaar mee gaat.

633. CEN 2011, CEN 2019

634. Geformuleerd door het Europees GCO, of 'Institute for Environment and Sustainability'.

In 2018 werd de MMG methode openbaar beschikbaar gemaakt in de online berekeningstool TOTEM⁶³⁵. TOTEM maakt de milieuimpact berekening van gebouwelementen nadat deze elementen als functionele eenheden in de tool zijn gedefinieerd. In wat volgt, worden de resultaten weergegeven voor de beschouwde 4 wanden en de referentiewand, en worden ze voorzien van commentaar.

Algemene bemerkingen

Resultaten (zie volgende pagina) in het onderstaande deel werden bekomen in de TOTEM tool.

- » Ten eerste moet worden opgemerkt dat – hoewel de precieze waarden anders doen uitschijnen – het om een benaderende berekening gaat. Dit ligt enerzijds aan de inputdata. Zoals eerder vermeld is deze gedeeltelijk afkomstig van de Ecoinvent database, wat een verzameling is voor data over heel West-Europa. Hoewel zaken zoals de elektriciteitsmix⁶³⁶ werden aangepast naar de Belgische context, is dit voor vele andere zaken niet het geval. Zo werd alle informatie over producenten, gebruikte productietechnieken, verdelers, aannemers, etc. die werd verzameld in de casestudies niet gebruikt in de EC berekening zelf. Dit geldt ook in het bijzonder voor transportafstanden, waarbij in dit geval West-Europese gemiddelden ten opzichte van België werd gebruikt in plaats van de werkelijke afstanden en vervoersmiddelen⁶³⁷. Uiteraard zorgt dit er bijvoorbeeld voor dat positieve invloed van de hout- en strobaleproductie in wand D, die respectievelijk lokaal tot uitermate gebeurden, niet wordt betrokken in de berekening. Desalniettemin is een vergelijking van ‘gemiddelde materialen’ nog steeds waardevol, aangezien productieprocessen voor de meeste materialen in West-Europa niet enorm verschillen van producent tot producent, en de berekening op deze manier een uitspraak doet over de wandopbouwen en aangewende diktes.
- » De berekening werd enkel uitgevoerd voor de materiaalgebonden EC. Dit wilt niet zeggen dat de energievervuiling niet werd ingerekend, maar wel dat geen rekening werd gehouden met het operationele energieverbruik van de woningen waar de buitenwanden deel van uitmaken en de CO₂ die werd geproduceerd om deze energie op te wekken. De EC werd berekend voor de hele levenscyclus van het materiaal voor zover deze vervat zit in de MMG berekening: levenscyclusfasen A1 – C4. Verder werden de fasen ‘A1-A3. Productie’, ‘A4. Transport naar de werf’, ‘A5. Bouw en installatie’ en ‘B2. Onderhoud’ ook apart berekend. Dit zijn immers de enige levenscyclusfasen die alle wanden al doorlopen hebben⁶³⁸. De EC waarde die voor alle levenscyclusfasen samen werd bekomen is dus groter dan de som van de overige waarden, aangezien hier ook de niet weergegeven levenscyclusfasen zijn bijgerekend.
- » De CO₂ captatie in het carbonatatieproces van kalk in kalkhennep en kalkpleisters wordt niet betrokken in de berekening. Dit zorgt ervoor dat de EC waarde van de 4 wanden mogelijks wordt overschat, wat niet het geval is bij de referentiewand aangezien daar geen kalk in wordt gebruikt. Deze overschatting is proportioneel groter en nadeliger voor wand B, aangezien in deze wand de grootste hoeveelheid kalk werd gebruikt⁶³⁹.

635. Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials

636. De verschillende energievormen die aan de basis liggen van de elektriciteitsproductie in een bepaald land.

637. De EC die vervat zit in het transport is in de meeste gevallen echter beperkt.

638. Op uitzondering van wand D, die nog niet is afgewerkt en daarmee nog nooit is onderhouden.

639. Wand D is deels opgebouwd uit 65,48 kilo aan kalkpleisters en 109,72 kilo aan kalkhennep (per m²) (zie onderdeel ‘Wand B: Kalkhennep in renovatie, Edegem’).

EC berekening wanden A,B,C,D en Z					
	Wand A	Wand B	Wand C	Wand D	Wand Z
[kg CO ₂ / m ²]	Kalkhennep +houtskelet, nieuwbouw	Kalkhennep+ baksteenwand, renovatie	Stroleem+ houtskelet, nieuwbouw*	Strobalen+ houtskelet, nieuwbouw	Pur-plaat+ spouwmuur, nieuwbouw
Klimaatverandering	PRODUCTIE (A1-A3)				
Fossiel	71	106	30	40	101
Biogeen	-51	-48	-54	-69	0,85
Landgebruik e.v.i.l.	0,18	0,1	0,08	0,15	0,36
Klimaatverandering	TRANSPORT NAAR DE WERF (A4)				
Fossiel	2,7	3,3	6,1	2,9	5,3
Biogeen	0,0011	0,0014	0,0026	0,0012	0,0022
Landgebruik e.v.i.l.	0,00093	0,0011	0,0022	0,001	0,0018
Klimaatverandering	BOUW EN INSTALLATIE (A5)				
Fossiel	3,9	5,6	2	2,3	5,8
Biogeen	0,019	0,019	0,0091	0,016	0,043
Landgebruik e.v.i.l.	0,0093	0,0053	0,0042	0,0076	0,018
Klimaatverandering	ONDERHOUD (B2)				
Fossiel	4,9	23	11	~	3
Biogeen	0,027	0,13	0,056	~	2,8
Landgebruik e.v.i.l.	0,0023	0,011	0,0053	~	0,056
	MATERIALEN (A1-C4)				
Fossiel	95	187	69	107	132
Biogeen	0,54	0,85	0,38	0,74	0,98
Landgebruik e.v.i.l.	0,2	0,14	0,1	0,18	2,3
Klimaatverandering	96	188	69	108	136

* 'e.v.i.l.' staat voor 'en verandering in landgebruik'.

** In dit geval wordt wand C als nieuwbouw gerekend aangezien de wand zelf wel volledig nieuw is (maar de woning niet).

- » Het enige aspect waarop de referentiewand beter scoort is het onderhoud. Dit is te wijten aan een kortere materiaallevensduur voor kalkpleisters (TOTEM rekent hiervoor 40 jaar) dan voor een gevelsteen (> 60 jaar). Dit komt ongeveer overeen met de inschatting van pleisterwerker Geert De Jonghe⁶⁴⁰.
- » De resultaten van deze exploratieve EC berekening laten zien dat de wanden A, C en D verantwoordelijk zijn voor een lagere CO₂ productie dan de referentiewand, een spouwmuur met PUR-isolatieplaten. Wand B heeft een significant hogere EC waarde, waar verder wordt op ingegaan.

640. Zie onderdeel 'A2. Wapeningsnet'.

641. Overigens zijn de verschillen tussen de EC waarden van de 4 wanden beperkt voor deze levenscyclusfase.

Wand A

- » Met een EC waarde van 96 kg CO₂/ m² bedraagt de CO₂ gerelateerde milieuimpact van wand A 70,5% van die van de referentiewand Z. Wand A scoort het beste van de 4 wanden op aspect van het transport naar de werf⁶⁴¹. Waarschijnlijk heeft dit te maken met het gebruik van dense (pleisters) en stapelbare (houtvezelplaten en houtskelet) materialen die een efficiënt transport mogelijk maakten.
- » De ingerekende biogene CO₂ opslag in de productiefase is te wijten aan het gebruik van hennepscheven als isolatiemateriaal, wilgenmatten als pleisterondergrond, en een houtskelet uit fijnspar (SLS) als draagstructuur. Een 1-jarige wilgenstruik heeft 15 - 20 ton CO₂ opgeslagen per hectare gewas, en de fijnspar die wordt geteeld in bosbouw voor constructiehout heeft jaarlijkse opslagcapaciteit van 9,7 - 13 ton CO₂/ hectare⁶⁴².

642. Berge 2009, p162

Wand B

- » Met een EC waarde van 188 kg CO₂/ m² bedraagt de CO₂ gerelateerde milieuimpact van wand B 138,2% van die van de referentiewand Z. Dit is een opmerkelijk hoge waarde voor een wand waarvan de nieuwe delen enkel uit geo- en biogebaseerde materialen bestaan. 57,4% van de EC (108 kg CO₂/ m²) is te wijten aan het gebruik van de hydraatkalkpleisters aan de binnen- en buitenkant. De levenscyclusfasen waarop deze kalkpleisters de grootste invloed heeft zijn de productiefase en de onderhoudsfase. De slechte score is tevens toe te schrijven aan het feit dat het carbonatatieproces zoals eerder aangegeven niet wordt meegerekend in de EC berekening. Aangezien in wand B enkel pleisters op basis van hydraatkalk werden gebruikt, is dit gebrek in de berekening allicht verantwoordelijk voor een behoorlijke overschatting.

Wand C

- » Met een EC waarde van 69 kg CO₂/ m² bedraagt de CO₂ gerelateerde milieuimpact van wand B 50,7% van die van de referentiewand Z. Wand C heeft daarmee de laagste EC waarde volgens deze berekening. Deze gunstige waarde is toe te schrijven aan gebruik van stroleem en de beperkte dikte van de kalkcementpleister. De relatief hoge score op de transport levenscyclusfase en dat weer te wijten aan datzelfde gebruik van stroleem: een licht materiaal dat veel verplaatsingen vereist per volume dat door het stro uiteindelijk in de wand wordt ingenomen.

Wand D

- » Met een EC waarde van 108 kg CO₂/ m² bedraagt de CO₂ gerelateerde milieuimpact van wand B 79,4% van die van de referentiewand Z. Deze betrekkelijk hoge waarde is voor 82% (88,56 kg CO₂/ m²) te wijten aan het gebruik van de ongeveer 48mm dikke buitenpleister, die bestaat uit een traskalkpleister en een hydraulische kalkpleister.

Besluit

Wat is het werkelijk potentieel van oorspronkelijk pré-industriële bouwtechnieken, gebaseerd op aarde en organische materialen, voor het ontwerp en de realisatie van hedendaagse, duurzame wandopbouwen in de Lage Landen?

Dit was de onderzoeksvraag die aan de basis lag van de masterscriptie. Om er op te kunnen antwoorden werd een tweeledige structuur gevolgd, waarin om te beginnen een overzicht werd gecreëerd van de pré-industriële bouwtechnieken en in het volgende deel werd bekeken welke lessen de constructiewereld hier momenteel uit trekt. Dit onderzoek werd gevoerd vanuit de observatie dat geo- en biogebaseerde bouwmaterialen vandaag een deel van de markt beginnen te veroveren, en soms aangeprezen worden als het – al dan niet enige – ecologische en duurzame alternatief voor de toekomst van het bouwen.

De bouwtechnische bloemlezing van de wand liet zien hoe aardebouw in het verleden werd gekarakteriseerd door een verregaande afhankelijkheid van de onmiddellijke omgeving van de werf. Het gebruik van hout als draagconstructie in de aardewand nam doorheen de eeuwen toe en bereikte haar hoogtepunt in het vakwerk, met vlechtwerkinvulling. Zowel de productie van de houten skeletonderdelen, als de ontginning van de nodige geomaterialen en plantaardige of dierlijke vezels, was een bijzonder arbeidsintensief proces met een hoge 'kost' in manuren, aangezien het vervaardigen van bouwmaterialen een volledig manuele arbeid was. Daarom werden de houten draagstructuren opgevat als een verzameling van bijzonder 'durable' en demontabele elementen. Samen met deze vakwerkonderdelen ontwikkelde zich binnen de gemeenschap een uitgebreide bouwtechnische kennis, die werd verankerd in iedere bewoner. De milieutechnische impact van vakwerkwanden was laag. Wat betreft het EC gehalte waren de productie van skeletonderdelen, het ontginnen en mengen van geschikte grond en het verzamelen van vezels processen met een verwaarloosbare milieuimpact. Hetzelfde kan worden gezegd van het manuele constructieproces.

De industrialisering van de West-Europese gebouwindustrie is mede verantwoordelijk voor de klimaatopwarming, wat de reden is waarom wordt teruggerepen naar deze 'natuurlijke' bouwmaterialen, die in het verleden op een dermate ecologische manier werden benut. Net enkel in de literatuur, maar ook bij producten en verdelers van bouwmaterialen worden materialen als leem- en kleipleisters, kalkhennep, stroleem en strobalen, constructiehout,... dan ook aangeprezen als een duurzaam alternatief. Door in het tweede deel 4 geo- en biogebaseerde wanden in kaart te brengen werd nagekeken in hoeverre geo- en biomaterialen van nu nog beantwoorden aan de condities van vroeger.

De kwantitatieve analyse van de wanden gaf een volledig ander beeld dan datgene wat voortkwam uit deel 1. De identificatie van hedendaagse materiaalstromen liet duidelijk zien hoe de West-Europese bouwsector nu een complexe en gespecialiseerde industrie is geworden in al haar facetten, van productie tot afbraak. De hyper efficiënte organisatie van deze industrie is voor een deel te wijten aan de noodzaak van gereguleerde kwantificering van eigenschappen zoals isolatiewaarden of draagvermogen, en de noodzaak om deze eigenschappen over een langere periode met zo weinig mogelijk onderhoud te garanderen. Vele eigenaars beheersen immers niet langer de bouw en het onderhoud van hun eigen woning – wat overigens niet geldt voor de eigenaars van de casewoningen. Opmerkelijk genoeg volgen deze observaties uit de studie van geo- en biogebaseerde wanden. In elke wand werd een opvallende verscheidenheid aan materialen gedocumenteerd die elk hun oorsprong

vinden in een reeks complexe processen. Dit werd duidelijk in de productie van hout, aarde, wapeningsnetten en kalkhoudende producent, maar zelfs in iets eenvoudig als een wilgenmat. Bovendien werden zeer vele materialen of hun samenstellende delen van buiten de landsgrenzen aangevoerd, waardoor transport een hele bijdrage levert aan de milieupact van de wand. Deze complexiteit in de materiaalstromen vertaalt zich in een niet-verwaarloosbare kwantitatief berekende hoeveelheid aan EC. Met scores van 96, 188, 69, 108 [kg CO₂/ m²] voor de respectievelijke wanden A, B, C en D, scoren drie wanden beduidend beter dan de referentiewand Z (136), maar kan niet over een verwaarloosbare impact worden gesproken.

Wat is dan het potentieel van pré-industriële technieken? De kritische bemerkingen die volgen uit deel 3 nemen niet weg dat de intrinsieke kwaliteiten van de geo- en biograndstoffen onbetwistbaar zijn, en dat de bijhorende productieprocessen in de meeste gevallen een veel lagere energieconsumptie en CO₂ productie inhouden. Dat de milieupact niet nul is, ligt aan het feit dat de meesten vandaag niet meer de mogelijkheid hebben om bouwmaterialen te ontginnen in hun achtertuin, en is daarom ook volstrekt logisch. Zowel het kwalitatief onderzoek als de kwantitatieve analyse laten zien dat de impact van de beschouwde vierkante meters aan wand veel lager ligt dan bij conventionele wandopbouwen. De auteur zou zelfs het resultaat van de EC berekening voor wand D durven betwisten, aangezien hier geen rekening in werd gehouden met de relatief lokale materiaalproductie en de captatie van CO₂.

Welke lessen kunnen we dan trekken uit pré-industriële technieken? Lessen van inherent ecologische kwaliteiten van de grondstoffen aarde, kalk en hout, en lessen van korte productieketens. Het is immers de doorvoer van materialen in de moderne economie die gekoppeld is aan grote energie- en milieubelastingen. Omdat korte productieketens op maat van het materiaal vandaag nog zelden waarheid zijn, mag de geo- en biogebaseerde bouw van vandaag niet over één kam worden geschoren met die van eeuwen geleden. Moderne eco-materialen zijn gebaseerd op heel andere productie- en verwerkingsprocessen dan in het verleden, waarin plaatselijke handarbeid grotendeels is vervangen door enkele gecentraliseerde en grotendeels gemechaniseerde processen. Op deze manier is ecologisch bouwen nog steeds sterk geworteld in conventionele geïndustrialiseerde productieketens. De uitgevoerde analyse heeft aangetoond hoe, zolang chemische bindingen in fossiele brandstoffen manuren aan onderhoud blijven vervangen, het gebruik van vernaculaire bouwkennis slechts in beperkte mate levensvatbaar is.

Het potentieel van geo- en biogebaseerde constructie voor de toekomst is groot en daarom verdienen deze materialen een groter aandeel in de markt. De complexiteit die nu nog vervat zit in productieprocessen moet doorschuiven naar het constructieproces, om met lokale middelen én vakkennis een performante buitenwand te bouwen. Wanneer dit een wijdverspreide praktijk is geworden, zal de bouwplaats opnieuw de plek worden waar het gebouw echt wordt geproduceerd.

Geannoteerde bibliografie

Opzet

In dit laatste deel wordt een deel van de geraadpleegde literatuur opgelijst en voorzien van een korte inhoudelijke bespreking en commentaar van de auteur. Enerzijds dient deze geannoteerde bibliografie louter als gedeeltelijk track-record van het geleverde leeswerk voor deze scriptie, maar bovenal wordt ze opgesteld om als startpunt te dienen voor verder onderzoek. Hopelijk kan ze door een geïnteresseerde lezer, student of onderzoeker vroeg of laat worden gebruikt om verder in te gaan op één van de thema's die in deze scriptie werden behandeld. Belangrijk om te weten is dat de opgestelde lijst slechts een - te klein - deel van de hele bibliografie uitmaakt. De relevantie van een werk voor de scriptie was het belangrijkste selectiecriteria, maar uiteraard is dit een sterk subjectief gegeven dat in grote mate afhankelijk is geweest van de opinie van de auteur. Hetzelfde geldt voor de inhoudelijke besprekingen en vooral voor de voorziene commentaar per werk. Bovendien kan terecht worden aangenomen dat slechts een beperkt deel van alle relevante literatuur door de auteur werd gevonden en geraadpleegd. Voor een volledige bronnenlijst van de scriptie wordt verwezen naar de bibliografie. Een volledige bronnenlijst voor de behandelde thema's bestaat echter eenvoudigweg niet, en is een zoektocht an sich waaraan elke onderzoeker zelf moet deelnemen.

De publicaties worden alfabetisch op titel geordend, maar eerst worden ze gegroepeerd per overkoepelend thema – wat overigens niet per se het hoofdthema van het werk hoeft te zijn. Een werk kan ook onder meerdere thema's worden geplaatst. Dit moet toelaten om snel de inhoud van een werk te kunnen inschatten, alvorens te lezen waar het precies over gaat. Onder de cover van de publicatie staat ook steeds aangegeven waar ze werd verkregen in het kader van deze scriptie. Hierbij worden de volgende afkortingen gebruikt:

- TW01: Faculteitsbibliotheek Ingenieurswetenschappen en Architectuur, Universiteit Gent
- BIB: Bibliotheek Boekentoren, Universiteit Gent
- CaGeWeB: Catalogus Gentse Wetenschappelijke Bibliotheken
- ---: niet in een bibliotheek ontleend.

Ordering per thema

Bouwfysica

- Light earth building: a handbook for building with wood and earth
- Sustainable Building with Earth
- Studie van bouwfysische kenmerken van lemen vakwerkwanden

Constructie, geschiedenis van

- Discovering timber-framed buildings
- Ontwikkelingsgeschiedenis van onze landelijke architectuur
- The New World Dutch Barn
- Traditional Timber Framing
- Vademecum: historische bouwmaterialen, installaties en infrastructuur
- Vakwerkbouw in Limburg
- Van vlechtwerk tot baksteen: geschiedenis van de wanden van het boerenhuis in Nederland

Constructie, hedendaagse

- Light earth building: a handbook for building with wood and earth
- Sustainable Building with Earth
- The ecology of building materials

Gebruik van gebouwen

- Hoeven op land gebouwd: een verhaal van boerderijen, landschappen en mensen

Materialenleer

- The ecology of building materials
- Vademecum: historische bouwmaterialen, installaties en infrastructuur
- Van vlechtwerk tot baksteen: geschiedenis van de wanden van het boerenhuis in Nederland
- Studie van bouwfysische kenmerken van lemen vakwerkwanden

Vernaculaire architectuur, Belgische

- Vakwerkbouw in Limburg
- Ontwikkelingsgeschiedenis van onze landelijke architectuur
- Van vakwerk tot baksteenbouw

Vernaculaire architectuur, geschiedenis van

- Discovering timber-framed buildings
- The New World Dutch Barn
- Hoeven op land gebouwd: een verhaal van boerderijen, landschappen en mensen

Volkskunde

- Ontwikkelingsgeschiedenis van onze landelijke architectuur
- Van vakwerk tot baksteenbouw

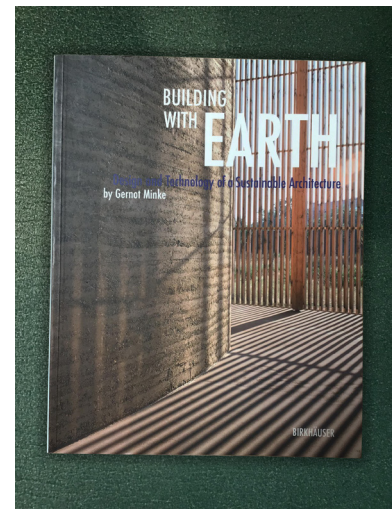
Bibliografie

Minke, Gernot. 2006. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Basel: Birkhauser-Publishers for Architecture.

'[People] are coming to realise that mud, as a natural building material, is superior to industrial building materials such as concrete, brick and lime-sandstone. Newly developed, advanced earth building techniques demonstrate the value of earth not only in do-it-yourself construction, but also for industrialised construction involving contractors.' (p11)

'Building with earth' biedt een praktisch en systematisch overzicht van de eigenschappen en hedendaagse toepassingen van leem, of kleiachtige aarde, en het breed scala aan technieken om deze te verwerken. Het boek bestaat uit 2 delen. Het eerste deel behandelt de 'technologie van aardebouw'. De eerste hoofdstukken gaan over de constructieve en bouwfysische eigenschappen van bouwvaarde ((testen van) samenstelling/ effect van water, damp en warmte/ sterkte/ pH-waarde/ radioactiviteit/ bescherming tegen hoge frequentie elektromagnetische golven), over het klaarmaken van de aarde als bouw materiaal, en over het verbeteren van de eigenschappen door middel van additieven. De 7 volgende hoofdstukken in het eerste deel behandelen elk een moderne geogebaseerde constructiemethode, van stamperbouw tot leempleisters. De laatste 3 hoofdstukken zijn van nog meer praktische aard: deze gaan over het repareren van aarde componenten, het onderwerp van specifieke gebouwelementen, en aardbevingsbestendige gebouwen. In het tweede deel worden 14 residentiële projecten en 13 'culturele, pedagogische en sacrale' gebouwen kort gedocumenteerd aan de hand van foto's en plannen. De publicatie is uitvoering geïllustreerd met grafieken, foto's en tekeningen.

'Building with earth' is uitermate geschikt om een begrip te krijgen van de invloed van bepaalde parameters, of van de samenstellende delen in een grondmengsel, op de materiaaleigenschappen van het mengsel. De publicatie toont aan welke parameters van belang zijn voor een geschikt grondmengsel, en geeft ook voor redelijk veel mogelijke samenstellende delen aan wat hun invloed is op bepaalde parameters. Steeds wordt verwezen naar geraadpleegde wetenschappelijke literatuur, zodat de lezer deze indien gewenst kan raadplegen. De hoofdstukken die hedendaagse constructiemethoden behandelen tevens rijk geïllustreerd en geven een goed overzicht van de desbetreffende techniek, maar zijn wel te summier om als handleiding te kunnen dienen bij een echte werf. De gebouwen die in het tweede deel werden gedocumenteerd dienen eerder als illustratie van wat met aarde mogelijk is. Er wordt niet met eenzelfde grondigheid als in de eerste hoofdstukken – of helemaal niet – ingegaan op de gebruikte materialen en hun eigenschappen. De ontwikkelde theoretische kennis wordt dus niet toegepast op een praktijkgeval.



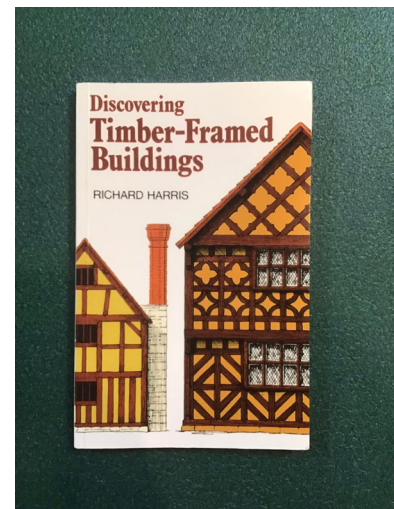
Building with Earth

Harris, Richard. 2003. *Discovering Timber-Framed Buildings*. 3. rev. ed. Discovering Series 242. Princes Risborough, Buckinghamshire: Shire Publications Ltd.

'The purpose of this book is to show how beams were put together to form buildings. [...] Creating a building from trees is a bit like alchemy. Instead of turning base metal into gold, the alchemist-carpenter had to turn trees into beams, into frames, into buildings.'

'Discovering timber-framed buildings' is geschreven als introductie op de houtbouwtechniek in Engelse en Welshe huizen, hutten en schuren uit de 16e – 18e eeuw. Het is technisch van aard en bijgevolg worden er veel bouwkundige termen gebruikt, die worden verduidelijkt door talrijke technische tekeningen en een beperkt aantal foto's. Het boek bestaat uit 11 hoofdstukken. De eerste 3 hoofdstukken geven een overzicht van de structurele opbouw van een vakwerkgebouw, de constructiemethoden en gebruikte materialen, en de elementen die specifiek zijn aan het vakwerk. Hoofdstuk 4 gaat over verschillende gebouwtypes, gaande van open hallen tot stedelijke woningen of boerderijen. In de hoofdstukken vijf, 6 en 7 wordt per geografische zone ingezoomd op vaak voorkomende typologieën en constructiemethoden en -details. Het achtste hoofdstuk gaat over het einde van de vakwerktraditie. In hoofdstukken 9 en 10 maakt Harris suggesties voor 'buildings to visit', en geeft hij richtlijnen mee voordocumenten van historische gebouwen. Het boekje wordt afgesloten met een argumentatie waarom bijkomend onderzoek van belang blijft.

'Discovering timber-framed buildings' doet precies dat wat het ambieert: een inleiding bieden in de overzeese vakwerkarchitectuur uit de 16e – 18e eeuw. Het onderwerp is inderdaad afgebakend tot Engeland en Wales, maar de heldere en gedetailleerde beschrijvingen en illustraties in dit werk kunnen evenzeer houtbouwmethodieken verduidelijken van elders in de wereld. Het boekje behandelt ook een redelijk breed spectrum aan gebouwen en beperkt zich niet tot de stad of het platteland, waardoor duidelijk wordt gemaakt dat ook wat betreft dit onderscheid de context de bouwwijze kan bepalen. Binnen de beperkte omvang van het boek, zorgt dit er echter wel voor dat het werk steeds inleidend en meestal geen onderwerpen worden uitdiept. Desalniettemin is het een werk dat duidelijk is, aangenaam leest en een goed overzicht schept van de Engelse houtbouwtechniek.



Discovering Timber-Framed Buildings

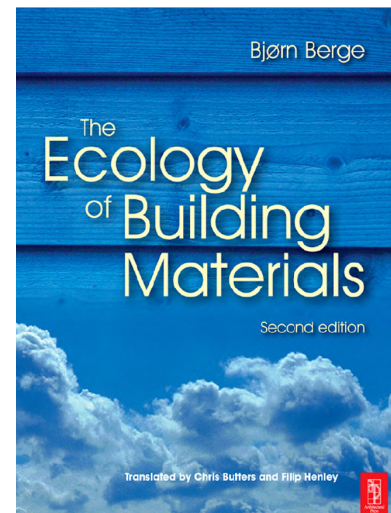
CaGeWeB, Gent

Berge, Bjørn. 2009. *The Ecology of Building Materials*. 2nd ed. Amsterdam Oxford: Elsevier/Architectural Press.

'In order to ensure an environmentally responsible building, it is important to obtain precise answers to questions such as "Is the steel produced in a blast furnace or an electric arc furnace?", "Are pozzolanas used in the cement clinker?", or "What kind of adhesive is used in the hemp matting, and how much?". [...] Green products are now much in demand, and many producers are claiming to fit this mould without apparent justification.' (p xv)

'The ecology of Building Materials' is een encyclopedie voor de productie, het gebruik, en de milieupact van bouwmaterialen. In 3 delen die onderverdeeld zijn in 19 hoofdstukken behandelt het werk bestaande en nieuwe materialen, waarbij behoorlijke aandacht wordt gespendeerd aan plantaardige producten, vaak met traditionele bereidingswijzen. Alle vaste onderdelen en elementen die een gebouw vormen, met uitzondering van technische installaties, komen aan bod, met een focus op materialen die een 'hoge milieustandaard' hanteren. In milieutechnisch opzicht minder aantrekkelijke en vaak meer conventionele materialen worden minder uitvoerig behandeld. In deel 1, 'Milieuprofielen en beoordelingscriteria', worden instrumenten besproken om materialen te evalueren en te selecteren op basis van productiemethoden, grondstoffen, en energie- en vervuilingaspecten. Deel 2, 'Grondstoffen en basismaterialen', stelt de materialen voor waarover de mens beschikt. Dit deel is onderverdeeld in hoofdstukken die de verschillende organische en minerale materialen bespreken en de ecologische gevolgen van de verschillende manieren om ze te gebruiken. Deel 3, 'Bouwmaterialen' gaat per hoofdstuk over toepassingsgebieden, zoals structurele materialen en beschermende materialen, en beoordeelt de bruikbaarheid van verschillende alternatieven vanuit ecologisch oogpunt.

'The ecology of Building Materials' is een bijbel. Het werk doet precies wat het beoogt: het beschrijven van 'bouw materiaal-ecologieën'. Het begrip 'ecologie' gaat in dit geval niet enkel over het (milieu)technische, maar ook over de socio-economische en in een beperktere mate socio-culturele dimensie van de levensloop van een bouw materiaal. De publicatie beschrijft productieprocessen en hun impact op het milieu, oude en moderne constructiewijzen, transportsystemen en end-of-life toepassingen. Deze holistische aanpak geeft de architect een beeld van wat het betekent om zijn project te bouwen met materiaal dat ergens wordt ontgonnen en geproduceerd, en is dus in feite een must-read voor de ontwerper. Hoewel de meeste materialen niet in uitvoerig detail worden besproken – wat te wijten is aan het feit dat er een zeer groot aantal wordt beschreven – is aan het einde van elk hoofdstuk een notenapparaat voorzien met meer diepgaande studies. Dit werk laat de lezer snel toe een begrip te krijgen van de impact van een gebouw op de rest van de wereld.



The ecology of Building Materials

Online raadpleegbaar

Goedseels, Vic, en Luc Vanhaute. 1979. *Hoeven op land gebouwd: een verhaal van boerderijen, landschappen en mensen*. Tielt: Lannoo.

'Zowel Vlaanderen als Wallonië telt vandaag [1979] nog verschillende honderden boerderijen die tijdens de vorige 7 eeuwen tot stand zijn gekomen. [...] Ze werden zonder grote architecten gebouwd, maar mét veel praktisch-functioneel inzicht, en een bouwkundige ervaring van eeuwen.' (p11)

'Hoeven op land gebouwd' vertelt het verhaal van deze landbouwbedrijven, binnen de grenzen van het huidige België. Vanuit landbouwkundig oogpunt brengen Goedseels en Vanhaute de verschillende Belgische hoevetypologieën in kaart. Bij de beschrijving van een bepaalde typologie wordt stevast een logica ontwikkeld die enerzijds berust op de ondergrond en het landschap waarin de hoeve werd gebouwd, en anderzijds op de manier om op de meest efficiënte wijze aan landbouw te doen, want 'het hoevegebouw in zijn totaliteit werd bepaald door het milieu en de respons van de boer' (p17). De ontwikkelingen achter de verschillende typologieën wordt eveneens geplaatst binnen ontwikkelingen van de landbouw op continentaal niveau. Het boek volgt een chronologische structuur. In 3 delen wordt eerst ingegaan op 'landbouuitbatingen van de prehistorie tot aan de middeleeuwen', vervolgens op 'bewaard gebleven historische hoeven', en ten slotte op 'vernieuwde boerderijbouw'. Het tweede en meest uitgebreide deel heeft een vierdelige structuur, waarbij het een algemene indeling van België voorstelt op basis van plattegrondvormen van hoeven. Binnen elk van deze 4 hoofdstukken wordt een verdere opdeling gemaakt zodat per landsdeel 3 typologieën worden gesitueerd.

'Hoeven op land gebouwd' is niet bouwtechnisch van insteek. Er wordt echter wel dikwijls ingegaan op de ontwikkeling van de wandtechnieken – waarin de bakstenen muur ook een belangrijk aandeel heeft, en op materialiteit. Beiden zijn immers sterk afhankelijk van het landschap waarin ze werden ontwikkeld, wat het argument van het boek ondersteunt. Deze bouwhistorische delen blijven steeds kort en louter beschrijvend, de analyse van een wandtechniek of een gebinte reikt nooit verder dan het erkennen van omgevingsinvloeden, en gaat nooit over krachtenwerking, materialenleer, etc. Het betreft dan ook voornamelijk een geschiedenis van de Belgische/ West-Europese landbouw. Het boek kan echter wel dienen om snel een goed overzicht te krijgen van de verschillende hoevetypologieën en hun wandtechnieken doorheen de geschiedenis, al moet worden opgemerkt dat het enkel over hoeves gaat en een zodanig specifieke geografische afbakening van typologieën nooit objectief is.



Hoeven op land gebouwd

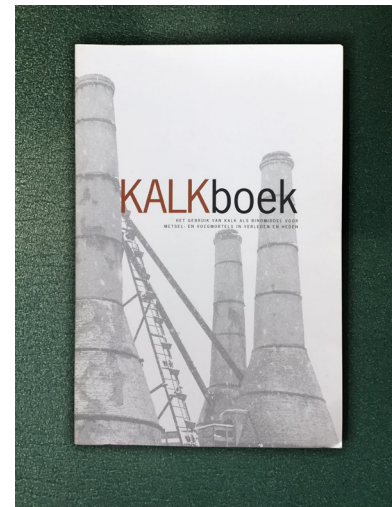
TW01, Gent

Balen, Koen van, en Bert van Bommel. 2003. *Kalkboek: het gebruik van kalk als bindmiddel voor metsel- en voegmortels in verleden en heden*. 2e dr. Zeist: Rijksdienst voor Monumentenzorg.

'Hoewel vandaag de dag de gemiddelde bouwvakker kalk nauwelijks meer kent, is kalk gedurende lange tijd het belangrijkste bindmiddel in de bouw geweest. Ons culturele erfgoed is er grotendeels mee opgetrokken.' (p15)

Het 'Kalkboek' behandelt de toepassing van een bijzondere en afzonderlijke groep metsel- en voegmortels: de kalkmortels. Daarbij komt de historische bouwpraktijk in België aan de orde, maar wordt ook en vooral gekeken naar de hedendaagse restauratiepraktijk, en wat deze mortels daarvoor zouden kunnen betekenen. De publicatie bestaat uit 5 delen. In het eerste deel ('Kalk, ethiek en ecologie') dient als introductie voor de waaier aan bindmiddelen voor mortel en hun eigenschappen, waarbij steenkalk en schelpkalk worden vergeleken met cement. Het tweede deel ('Historische bindmiddelen') geeft een Europese geschiedenis weer van het gebruik van kalk door de eeuwen heen. Het volgende deel ('Van grondstof tot mortel') bespreekt de samenstellende delen in kalkmortel – kalk, evt. puzzolanen en zand – en geeft voor elke grondstof het productieproces weer, waarbij de focus uiteraard ligt op de verschillende soorten kalk. Het vierde deel ('Duurzaamheid en verwerking') behandelt verschillende pathologieën van kalkmortels. In het vijfde en laatste deel ('Kalk in de praktijk') wordt een antwoord geformuleerd op 'het gebrek aan inzicht [in] de compatibiliteit van mortels voor reparatie en onderhoud van historisch metselwerk' (p175), vanuit de optiek van de hedendaagse praktijk. Dit deel is ook voorzien van 5 voorbeelden uit de restauratiepraktijk.

In het 'Kalkboek' hebben de auteurs 'getracht een zo compleet mogelijk beeld te schetsen van kalkgebonden mortels voor voeg- en metselwerk' (p10). Een belangrijke drijfveer voor dit werk was de promotie van kalk voor toepassing in mortels in de monumentenzorg, en het is dan ook opgebouwd rond de restauratiepraktijk. Over mogelijke toepassingen in pleisters of kalkhennep in geo- en biogebaseerd of natuurlijk bouwen an sich wordt nergens vermelding gemaakt. Desalniettemin worden de eigenschappen van kalk, en waarom en hoe het vroeger werd gebruikt, zeer nauwgezet weergegeven, wat de lezer toelaat deze kennis te koppelen aan nieuwe vormen van constructie. Vanuit de opzet van deze scriptie kunnen hierbij 2 opmerkingen worden gemaakt. Ten eerste gaat de publicatie niet op een kwantitatieve manier in op de ecologische voordelen van het gebruik van kalk. Ten tweede worden moderne productielijnen eerder summier besproken. Enkele foto's illustreren onderdelen in de industriële kalkproductie, maar verder worden deze niet in detail besproken. Het 'Kalkboek' blijft echter een essentieel werk voor ieder die diepgaande informatie zoekt over het historisch en modern bindmiddel.



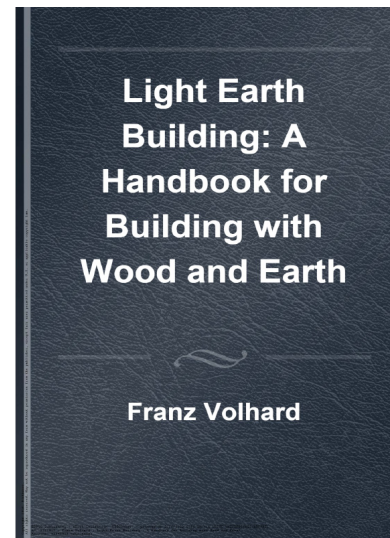
Kalkboek

Volhard, Franz. 2015. *Light Earth Building: A Handbook for Building with Wood and Earth*. Basel: Birkhäuser.

'Today's high-strength building materials are hard and in many cases stronger than they actually need to be. They are correspondingly hard to recycle [...]. Timber and earth constructions, by contrast, are easily adapted and converted to new uses, and the majority of its constituent building materials can be re-used or recycled.' (p10)

'Light Earth Building' werd voor het eerst gepubliceerd in Duitsland in 1983. Destijds had de publicatie als opzet een diepgaande studie uit te voeren van alle raadpleegbare literatuur en normen om op systematische manier de manieren te onderzoeken waarop muren, vloeren en daken konden worden gebouwd door gebruik te maken van aarde en stro. De huidige zevende editie vertrekt vanuit dezelfde opzet maar heeft een nieuwe structuur die beter aansluit bij de manier waarop gegebaseerde materialen en gebouwonderdelen worden verdeeld in de Duitse aardebouwnormen (Lehmbau Regeln). Verder is de nieuwste editie uitgebreid zodat zowel historische technieken worden besproken als de hedendaagse manuele constructie met stroleem en zwaardere 'lichte aarde mengsel'. Na het inleidende 1e hoofdstuk worden in hoofdstuk 2 en 3 de eigenschappen van bouwarme als materiaal besproken, alsook hoe van aarde een bouw materiaal kan worden gemaakt. In hoofdstukken 4,5,6 en 7 gaat het opeenvolgend over 'natte' constructiemethoden, 'droge' constructiemethoden, aspecten van het bouwen en het afwerken van gebouwen, en planning en kosten van een aardebouwproject. Hoofdstuk 8 heeft tenslotte een bouwfysische inslag, hier worden de volgende fysische parameters van aarden bouwelementen besproken: thermisch gedrag, vocht/droging, gedrag bij brand, geluidsisolatie, luchtdichtheid, en de absorptie van giftige stoffen. Ten slotte worden nog een aantal hedendaagse projecten besproken.

'Light Earth Building' is een werk waarin het exploratieve karakter van de eerste editie uit 1983 nog sterk in terugkomt. Het is dan ook een publicatie die werd geschreven met het oog op de zelfbouwer. Doordat echter vrijwel elk onderdeel wordt voorzien van de nodige technische achtergrondinformatie, is het ook een werk dat voor deze informatie kan worden gelezen. Voor de lezers die zoeken naar technische publicaties of zelfbouw literatuur pur sang, zal dit werk niet voldoen. Doordat het zich echter tussen de 2 uitersten situeert, goed gestructureerd en aangenaam geschreven is, en voorzien is van talrijke illustraties, blijft het een zeer degelijk en toegankelijk werk voor hen die zich willen verdiepen in materiaalparameters of niet-geïndustrialiseerde constructietechnieken.



Light Earth Building

Webcatalogus VUB

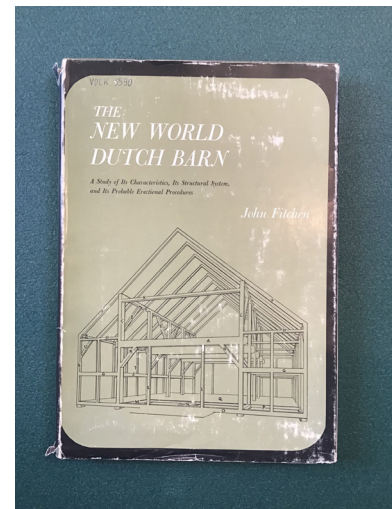
Fitchen, John. 1968. *The New World Dutch Barn*. 1ste dr. Syracuse, New York: Syracuse University Press.

'[The] perennial lack of recognition [of barns in historical investigation and publication] is the more unaccountable in light of the fact the throughout history barns have been perhaps the most essential buildings to serve man wherever he has tilled the soil and harvested crops.' (p2)

'The New World Dutch Barn' is een technisch verslag van een kenmerkende klasse van houten schuren gelegen in de Hudson-delta, in de Amerikaanse staat New York tijdens de koloniale periode, 1624-1775. Gebouwd voor en door hoofdzakelijk Nederlandse kolonisten, zijn de schuren in kwestie aanvankelijk nog sterk gelieerd aan overzeese constructiewijzen, maar Fitchen toont aan dat er na verloop van tijd onder invloed van het Amerikaanse continent nieuwe typologieën ontstaan. Het werk is gestructureerd in 3 delen. Na een historische introductie wordt in het eerste deel een systematische en gedetailleerde beschrijving gegeven van de schuren, waarbij ze ook worden vergeleken met voorbeelden uit de Oude Wereld. In het tweede deel wordt hun structureel systeem geanalyseerd. In dit deel wordt ingegaan op het hout als bouw materiaal, en worden de structurele werking en andere functies van de onderdelen van het houtskelet uitvoerig besproken. Het tweede deel wordt uitvoerig voorzien van tekeningen en foto's van hele constructies of details van houtverbindingen. In het derde deel wordt een hypothetische recreatie ontwikkeld van de oprichtingsprocedures en de voortgang die waarschijnlijk werd gevolgd in de constructie van de schuren. In dit deel wordt tevens geduimd wie waarschijnlijk wat en wanneer deed.

'The New World Dutch Barn' is een diepgaande studie naar het structurele systeem van een specifieke vorm van vernaculaire architectuur, die tegelijk aangenaam leest en voorzien is van een groot aantal figuren. De inhoudelijke link met vernaculaire architectuur uit de Lage Landen wordt enkel gemaakt wanneer het gaat over de invloed van de Nederlandse schuur en de bouwtechnische kennis die kolonisten met zich mee brachten, maar desondanks is de publicatie een zeer interessant voorbeeld van hoe een bepaald type gebouw op een technische manier kan worden gedocumenteerd, gebaseerd op veldwerk. Met name prikkelend is het deel waarin Fitchen de bouwprocedure beschrijft. '[...] the number of men required to do the job was a major factor in the erection of one of these early Dutch barns. Actually, it would seem to have had a profound influence on the very nature and make-up of the structural system that was adopted.' (p59) Deze invloed geldt zeker niet alleen voor koloniale schuren, en wordt in weinig literatuur voldoende erkend.

'One hears much these days, about revealed structure in architecture, and about the visual quality and expressiveness of interior space. With respect to both of these considerations, New York Dutch barns are unusually distinguished.' (p65)



The New World Dutch Barn

BIB, Gent

Trefois, Clemens Victor. 1979. *Ontwikkelingsgeschiedenis van onze landelijke architectuur*. Vol. 1. 4 vols. Sint-Niklaas: Danthe.

'Om in onze hedendaagse, stijlloze, van allen schoonheidszin ontblote hoeve nieuw leven te brengen, is het onontbeerlijk, dat we ons een beeld vormen van de bouwwijze in vroeger eeuwen. Dit beeld moet richting geven, moet terug de weg banen naar het ongekunstelde, naar een spontane evenwichtige architectuur.' (p5)

'Ontwikkelingsgeschiedenis van onze landelijke architectuur', oorspronkelijk gepubliceerd in 1950, is 'het klassieke basiswerk over de landelijke architectuur in West-Europa' (voorflap). Het is in de eerste plaats een volkskundig werk dat kan worden beschouwd als een overzicht van het oeuvre van Trefois, waarin hij afwisselend gebruik maakt van bouwtechniek en folklore om een argument van 'de oerkrachtige, rationele schoonheid van de landelijke vakwerkarchitectuur' te ontwikkelen. Het boek bestaat uit 6 hoofdstukken. In de eerste 2 wordt enerzijds een overzicht gegeven van 'de primitieve volksbouwkunst' in de Lage Landen, of courante constructietechnieken die dateren van vóór het vakwerk, en anderzijds wordt uitvoerig ingegaan op de constructieve onderdelen in de vakwerkarchitectuur, opgedeeld in delen over de wanden, het gebint en het dak. Beide hoofdstukken zijn rijk geïllustreerd met zowel foto's als tekeningen. Het derde en vierde hoofdstuk zijn meer architectuurtypologisch van aard, en behandelen de verschillende hoeve- en schuurtypen in Vlaanderen. De laatste 2 hoofdstukken zijn dan weer puur volkskundig, en beschrijven de inrichting van en buitenafwerkingen van de landelijke woningen, en gebruiken en symbolen bij het oprichten en bewonen van een hoeve. Het bronmateriaal bestaat enerzijds uit observaties uit veldwerk dat Trefois tijdens de late jaren '20 en '30 uitvoerde, waarbij hij een ruim scala aan nog bestaande hoeven opzocht en documenteerde. Anderzijds worden ook regelmatig onderzoeken en theorieën van andere volkskundigen of archeologen aangehaald, waar al dan niet mee akkoord wordt gegaan.

'Ontwikkelingsgeschiedenis van onze landelijke architectuur' is geen bron van onbetwistbare autoriteit. Op de voorflap word Trefois omschreven als 'radicaal en eertlijk Vlaming' die een eervolle plaats inneemt in de Vlaamse ontvoogdingsstrijd. 'Het is [dus] vanzelfsprekend dat in dit overzicht de Vlaamse boerderij in het middelpunt van de belangstelling staat' (p5). Deze publicatie moet dus met enige omzichtigheid worden gelezen. De precieze situering van bepaalde stijlen binnen bepaalde gebieden, het presenteren van bepaalde – al dan niet bouwkundige – invloeden van het ene volk op het andere; op deze theorieën zitten een hoop evidente spanningen. Daarbij komend zit er vaak weinig structuur binnen de afzonderlijke delen, wat er samen met de schrijftaal uit de jaren '50 voor zorgt dat het boek niet aangenaam te lezen is. De waarde als bronmateriaal van 'Ontwikkelingsgeschiedenis' zit echter in de talrijke nauwkeurige technische tekeningen, alsook in de foto's en uitvoerige beschrijvingen van bouwmaterialen en -technieken en – ja zelfs – gebruiken bij het bouwen. Het is echter aangeraden om voor een goed begrip van de inhoud ook secundaire literatuur te raadplegen, zoals Voskuil (1979), Goedseels en Vanhaute (1979) en Eggen (1989). Deze auteurs hebben zich stuk voor stuk voor een groot deel gebaseerd op Trefois, maar hebben zelf al het nodige geverifieerd en de betwistbare feiten achterwege gelaten.



Ontwikkelings- geschiedenis van onze landelijke architectuur

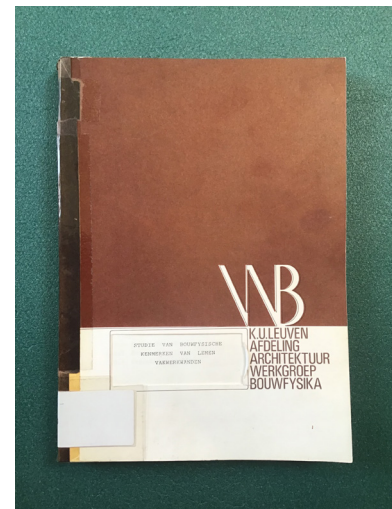
BIB, Gent

Vanros, Guy. 1981. 'Studie van bouwfysische kenmerken van lemen vakwerkwanden'. Diss. burgerlijk ingenieur-architect, Leuven: KU Leuven.

'Opvallend nu is de beperkte kennis van de vakwerktechnologie en het zo goed als ontbreken van gegevens over de opvullingen wat betreft samenstellingen en prestaties. [...] Stilaan werd deze techniek verlaten en geraakte ze in de vergetelheid.' (p1)

De opzet van deze masterscriptie was een theoretische kennis te verwerven van de wandinvulling van vakwerkwanden, op bouwtechnisch en -fysisch gebied. Het onderzoek is opgebouwd uit 2 delen. Ten eerste wordt een overzicht weergegeven van de opbouw van een vakwerkwand. Hierbij wordt kort ingegaan op het houtskelet, en uitvoeriger op de invulwanden. Er wordt een oplistijng gemaakt van de gebruikte materialen en de bereidingsprocedure van het grondmengsel. Bijzondere aandacht wordt gespendeerd aan de bescherming van de aardewand tegen degradatie, zij het door middel van een beschermingslaag of passieve bescherming, of door stabiliserende onderdelen in het mengsel. De informatie uit het eerste deel werd verkregen door een literatuurstudie en een initiatiecursus leembouw in het openluchtmuseum Bokrijk. In het tweede deel worden de werkwijze en de resultaten van de feitelijke bouwfysische studie gepresenteerd. Het betreft een hygrothermische studie van de stroleemopvulling in vakwerkwanden. De hygrische studie bestaat uit het nagaan van het gedrag bij droging, het hygroscopisch gedrag, de dampdiffusie en de capillaire opzuiging. De thermische studie houdt een meting in van de warmteweerstanden en de soortelijke warmtecapaciteit. Het experimenteel werk houdt het bepalen in van deze eigenschappen voor drie, in situ genomen, oude monsters en voor vijf, zelf opgebouwde, nieuwe proefmonsters. Voor deze laatsten werd geopteerd voor een zo groot mogelijke verscheidenheid in samenstelling. Door deze werkwijze wordt voor elke eigenschap een besluit getrokken over de invloed van de samenstellende delen op de desbetreffende eigenschap van het monster.

'Studie van bouwfysische kenmerken van lemen vakwerkwanden' presenteert een helder experimenteel onderzoek naar een aantal relevante hygrothermische eigenschappen die de toepasbaarheid van de vakwerkwand als buitenwand bepalen. De auteur stelt echter zelf dat er 'voor ogen [moet] worden gehouden dat het aantal onderzochte monsters erg klein is in vergelijking met het aantal variabelen. Het onderzoek heeft hierdoor een sterk explorerend karakter' (p50). Bovendien werden in de testmonsters enkel gebruik gemaakt van leemgrond, gebluste kalk, tarwestro en urine. Overige bestanddelen van historische vakwerkwanden werden niet beschouwd. Desalniettemin schept deze scriptie een goed beeld van de invloed van de geteste bestanddelen op bouwfysische parameters.



Studie van bouwfysische kenmerken van lemen vakwerkwanden

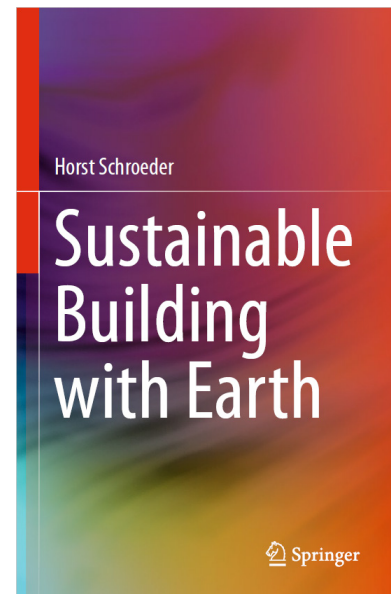
Bibliotheek 2Bergen, Campus Arenberg,
Leuven

Schroeder, Horst. 2016. *Sustainable Building with Earth*. Vertaald door Cornelia Theimer Gardella en Kurt Gardella. 1st ed. 2016. Cham: Springer International Publishing.

'[...] earth can be seen in a new light after years of being marginalized from conventional construction by industrially mass-produced building materials. Today, private as well as public clients are increasingly opting for the building material earth.' (p vii)

'Sustainable Building with Earth' is een technische verhandeling over aarde als grondstof voor verschillende soorten bouwmaterialen, met een sterke focus op materiaalparameters. Het inleidende 1e hoofdstuk geeft enerzijds een overzicht van de wereldwijde en Duitse geschiedenis van aardebouw, en bespreekt anderzijds de ecologische en economische aspecten van aardebouw als 'sustainable construction' en hoe deze te evalueren. Daarna wordt het idee van de levenscyclus van aarde als bouw materiaal gebruikt als het terugkerende thema in de publicatie. Zo behandelt hoofdstuk 2 alle verwerkingsstappen van de grond, inclusief de identificatie en winning van het materiaal. Hoofdstuk 3 gaat in op de voorbereiding van de grond en de verwerking tot bouwmaterialen en bouwelementen. In hoofdstuk 4 wordt het ontwerp van aarden gebouwen en het bouwen met aardetechnieken besproken. De bouwtechnische eisen die aan een constructie worden gesteld tijdens de nuttige levensduur van het voltooide gebouw, en het onderhoud ervan, is het thema van hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 behandelt de sloop van een aarden gebouw, en het recycleren en storten van aarden materialen waarmee de cyclus wordt beëindigd. In hoofdstuk 7 geeft de auteur ten slotte zijn visie op de toekomst van aardebouw en haar kansen als economisch en architecturaal zwaargewicht.

'Sustainable Building with Earth' gaat in tegenstelling tot veel werken over aardeconstructie nauwelijks over zelfbouw, maar is toch één van de meest praktijkgerichte publicaties. Door de manier waarop het geschreven is, verhoudt het werk zich immers duidelijk tot de – weliswaar Duitse – hedendaagse gebouwindustrie, één die net zoals elders in West-Europa sterk gecommercialiseerd en geïndustrialiseerd is en wordt gestuurd door regelgeving en normen. In deze publicatie wordt dan ook zeer regelmatig verwezen naar de eurocodes en de Duitse nationale DIN-normen (Deutsches Institut für Normung). Anderzijds worden hedendaagse productie- en constructieprocessen beschreven, die op beperkte maar toch op industriële schaal worden toegepast. Het is een zeer technisch werk, en daarmee niet even gemakkelijk of inspirerend om te lezen, maar ook dit drukt de realistische kijk op het hedendaagse bouwen uit dat eigen is aan het boek; dat van een technocratische benadering die steunt op kwantificeerbare materiaalparameters. Om methodieken te leren kennen waarmee de 'sustainability' van een materiaal kan worden achterhaald moet dit werk niet gelezen worden, om te leren over testprocedures die nodig zijn om een bouw materiaal op de markt te brengen, wel.



Sustainable Building with Earth

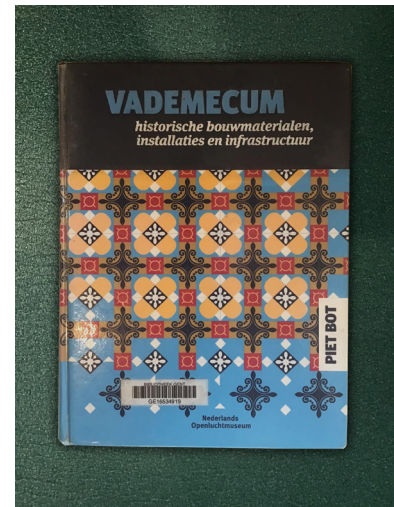
Online raadpleegbaar

Bot, Piet. 2009. *Vademecum: historische bouwmaterialen, installaties en infrastructuur*. Alphen aan de Maas: Veerhuis.

'Gebruikte bouwmaterialen zijn informatiedragers. Ze geven een indicatie van een ontwikkeling in een bepaalde tijd. [...] De architect ontwerpt een gebouw. Vervolgens worden door verschillende vakdisciplines allerlei materialen toegepast om dit ontwerp gestalte te doen krijgen.' (p10)

'Vademecum: historische bouwmaterialen, installaties en infrastructuur' is een poging om een handzaam – en Nederlands – overzicht te bieden van de oorsprong en ontwikkeling van bouwmaterialen en hun toepassing, waarbij het hoofdzakelijk bestudeerde tijdvak tussen 1840 en 2005 ligt. Daarnaast houdt het werk een gedeeltelijke behandeling in van bouwconstructies en de ontwikkeling van verschillende vormen van energie. Ook worden technische installaties, benodigde infrastructuur en de verpakking van materialen besproken. Op deze manier wordt in de publicatie veel verder ingegaan op de levenscycli van materialen dan op enkel hun technische eigenschappen en 'ontstaat een vademecum, dat de mogelijkheid biedt een gebouw en zijn omgeving op meerdere aspecten te beoordelen en te dateren' (p10). Het werk bestaat uit 29 hoofdstukken. Een aantal gaan in op klassieke materialen zoals natuursteen, baksteen, staal, hout en beton. Anderen behandelen constructiesystemen zoals lichte wanden, plafonds, systeemvloeren en funderingstechniek. Verder gaan een aantal hoofdstukken niet over bouwmaterialen maar over omkaderende thema's, zoals wegen en transport, verwarming, verlichting en energie, kortom: zaken die evenzeer essentieel zijn voor de constructie en het functioneren van een gebouw.

Het 'Vademecum' gaat niet over de 'oorsprong van bouwmaterialen', maar wél over de oorsprong en ontwikkeling van moderne bouwmaterialen, in Noordwest-Europa. Daarbij wordt de lezer duidelijk op welke manier conventionele moderne materialen in toenemende mate op een machinale- en industriële wijze werden gewonnen, vervaardigd en bewerkt. In vele gevallen gaat dit over de 'eenvoudigste dingen', zoals multiplex, bitumen of verf. Op het bouwen in hout na komt geo- en biogebaseerd bouwen als oorspronkelijk pré-industriële techniek dus niet voor in het werk, behalve dan in een schijnbaar misplaatst hoofdstuk over 'stro en riet als dakbedekking'. Het werk leest wel degelijk als een vademecum, waarbij per thema een reeks aan voorbeelden of mogelijke types wordt opgelijst. Elk type materiaal of apparaat wordt kort historisch gesitueerd, waarna de belangrijkste eigenschappen worden overlopen. Het werk is in ruime mate voorzien van illustraties. Een diepgaande materiaalstudie wordt dus nergens gemaakt, maar het 'Vademecum' kan perfect worden gebruikt om een beeld te krijgen van allerlei verschillende mogelijkheden. Niet enkel wat betreft moderne bouwmaterialen, maar ook mogelijkheden in productieprocessen, infrastructuur, machinerie en installaties.



Vademecum: historische bouwmaterialen, installaties en infrastructuur

Bibliotheek De Krook, Gent

Eggen, Coen. 1989. *Vakwerkbouw in Limburg*. Weert: M & P.

'De vraag naar met name meer technisch gerichte wetenswaardigheden over vakwerkbouw is de laatste jaren echter toegenomen, los van het feit dat er nog maar op beperkte schaal restauraties worden uitgevoerd.' (p7)

'Vakwerkbouw in Limburg' is samengesteld als synthetiserend overzicht van wat er gepubliceerd is en bij tal van slopen of restauraties aan gegevens vrij is gekomen over vakwerkbouw in en rond de provincie Limburg. Het boek is geschreven met als doel een zo groot mogelijk en 'ongeschoold' publiek kennis te laten maken met deze bouwwijze, waardoor vaktermen uitvoerig worden uitgeklaard én geïllustreerd en het is opgebouwd in een behapbare structuur. Deze structuur bestaat naast een inleiding uit 16 hoofdstukken, waarvan de volgorde van de inhoud min of meer overéénstemt met het bouwproces van een vakwerkhuis zelf. In de eerste hoofdstukken wordt uitgeklaard wat het vakwerk is en wat er in werd gebouwd. Vervolgens wordt uitgebreid ingegaan op de werktuigen die doorheen het hele bouwproces werden gebruikt, in mindere mate op de verschillende skeletonderdelen en hun markeringen en op het in elkaar zetten van het skelet. De hoofdstukken daarna behandelen verschillende delen in het vakwerkgebouw: het dak, schoren, ramen,... De laatste delen gaan over de wandinvullingen en het kleuren van de wanden, en er wordt afgesloten met het perspectief van de auteur op de toekomst van het vakwerk. Bij de publicatie werd een literatuurlijst toegevoegd met titels van werken die bereikbaar en relevant zijn voor het onderwerp.

'Vakwerkbouw in Limburg' leest als een encyclopedie: eenvoudig verwoord, uitgebreid en uitvoerig geïllustreerd. Dit werk is dus uitermate geschikt voor ieder die zich wilt inlezen in het desbetreffende onderwerp. Op bepaalde vlakken, zoals wanneer het gaat over gereedschap of nummering en andere teksten op balken, gaat het boek zelfs al redelijk in de diepte. Desondanks is dit voor vele aspecten van de vakwerkconstructie niet het geval, wat meteen een groot nadeel van dit werk aantoont: een notenapparaat is achterwege gelaten. Dit wilt zeggen dat niet elke bewering van de auteur kan worden gestaafd, maar ook dat het niet eenvoudig is om over een bepaald onderwerp dezelfde informatie op te zoeken als de auteur heeft gedaan. Ook moet de lezer zich ervan bewust blijven dat de focus wel degelijk op Limburg ligt, en bepaalde West-Europese typologieën of vakwerkvormen dus niet worden behandeld. Het is en blijft echter een toegankelijk werk dat doet wat het ambieert: een duidelijke overzicht scheppen van de vakwerkbouw in Limburg.



Vakwerkbouw in Limburg

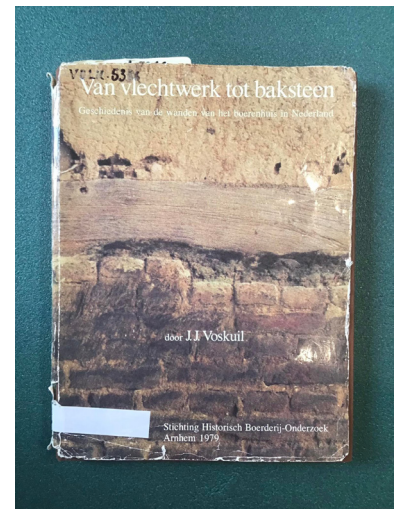
Bibliotheek De Krook, Gent

Voskuil, Johannes J., red. 1979. *Van vlechtwerk tot baksteen: geschiedenis van de wanden van het boerenhuis in Nederland*. SHBO-Monografieën 2. Arnhem: Stichting Historisch Boerderij-onderzoek.

'De wanden van het boerenhuis zijn uit bouwkundig en cultuurhistorisch oogpunt een aantrekkelijk onderwerp om te bestuderen: zij zijn in hun ontwikkeling in de tijd, misschien wel meer dan enig ander onderdeel van de boerderij, onderhevig geweest aan verschillende invloeden.' (voorflap)

'Van vlechtwerk tot baksteen' geeft een overzicht van de gebruikte wandtechnieken in Nederland en Noord-België vanaf de préhistorie tot het begin van de 20e eeuw. Het werk schetst een evolutie waarin tussen de late 13e eeuw en de eerste decennia van de 20e eeuw de opkomst en verspreiding van het gebruik van baksteen plaatsvindt, en beleemd vlechtwerk, hout en natuursteen langzaam worden vervangen; een beweging die zich volstrekt van west naar oost, noord naar zuid en rijk naar arm. Het boek bestaat uit 2 grote delen. Het eerste deel gaat over de toepassing van vlechtwerk, hout of plaggen tot de opkomst van de baksteen, en beschrijft per overkoepelende tijdsperiode gebruikelijke wandtechnieken in bepaalde delen van – voornamelijk – Nederland. In het tweede deel wordt de opkomst van de baksteen beschreven vanaf de 13e eeuw. In dit deel zijn enkele hoofdstukken geografisch van insteek, waarbij per landsdeel het verdwijnen van het vlecht- en vakwerk wordt geduid, en andere hoofdstukken bouw- en materiaaltechnisch, waarbij wordt ingegaan op de constructie van de vakwerkwand, houten wand, baksteenwand, etc. Voskuil maakt voor het bronmateriaal enerzijds in grote mate gebruik van andere auteurs en onderzoekers, die in veel gevallen al verslagen uitbrachten van archeologische opgravingen. Daarom komt het niet zelden voor dat een pagina meer voetnoten – met extra uitleg – bevat dan tekst. Anderzijds raadpleegt de auteur ook primaire bronnen, onder de vorm van iconografisch materiaal dat dateert uit de desbetreffende periode, of onder de vorm van nog bestaande gebouwen. De publicatie is uitvoerig voorzien van foto's maar niet van technische tekeningen.

'Van vlechtwerk tot baksteen' bevat een reeks bouwtechnisch georiënteerde hoofdstukken, waarin uitvoerig aandacht wordt besteed aan een beschrijving van constructiewijzen en materiaalgebruik, en in beperkte mate ook aan de nodige fysieke arbeid in het bouwproces. Er wordt achter vrijwel elk gebruik en elke verandering in een constructiewijze een oorzaak gezocht, waarbij niet zelden de theorieën van andere auteurs worden bevestigd, vergeleken met elkaar, of ontkracht door middel van Voskuils eigen argumenten. In enkele gevallen lijkt dit echter wat verdacht, alsof voor alles één of meerdere eenduidige redenen te vinden zijn. Desalniettemin is dit werk essentiële literatuur voor ieder die zich wenst te verdiepen in de geschiedenis van de – voornamelijk niet-stedelijke – buitenwanden in de Lage Landen.



Van vlechtwerk tot baksteen

BIB, Gent

Bronnenlijst figuren

Foto's van de auteur

Fig. 16 -18, 35-40, 55-58, 66-68, 70

Tekeningen van de auteur

Fig. 19-34, 41-52, 59-65, 72-80

Fig. 1 Voskuil 1979, p9

Fig. 2 A.E. Van Giffen

Fig. 3 A.E. Van Giffen

Fig. 4 Voskuil 1979, p108

Fig. 5 Tréfois 1979, p49

Fig. 6 Upton en Vlach 1986, p169

Fig. 7 J.J. Voskuil 1979, p18

Fig. 8 Fotocollectie C.V Tréfois,
Universiteitsbibliotheek UGent

Fig. 9 Tréfois 1979a, p42

Fig. 10 Fotocollectie C.V Tréfois 335,
Universiteitsbibliotheek UGent

Fig. 11 Voskuil 1979, p67

Fig. 12 Voskuil 1979, p64

Fig. 13 Voskuil 1979, p71

Fig. 14 Fotocollectie C.V Tréfois 234,
Universiteitsbibliotheek UGent

Fig. 15 Voskuil 1979, p77

Fig. 69 Luc Deschepper

Fig. 71 Luc Deschepper

Bibliografie

Interviews

De Jonghe, Geert. 02/08/2022. Interview met Geert De Jonghe over kalk- en leempleisters in Wand A. Videogesprek.

Deschepper, Luc. 13/07/2022. Interview met Luc Deschepper over woning D en de gebruikte materialen en technieken in wand D. Fysiek interview op locatie.

Everaerts, Victor. 06/05/2022. Interview met Victor Everaerts over zijn renovatieproject woning B en de gebruikte materialen en technieken in wand B. Fysiek interview op locatie.

Jordan, Wolf. 25/06/2022. Interview met Wolf Jordan over de eigenschappen van hydraatkalk in wand B. Videogesprek.

Maes, Frank, en Carla Verhulst. 07/05/2022. Interview met Frank Maes en Carla Verhulst over hun woning C en de gebruikte materialen en technieken in wand C. Fysiek interview op locatie.

Pieters, Stijn. 15/08/2022. Interview met Stijn Pieters over de buitenpleisters van wand D. Videogesprek.

Swolfs, Marc. 30/06/2022. Interview met Marc Swolfs over de eigenschappen van hydraulische kalk. Videogesprek

Boeken

- Ashby, M. F. 2013. *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*. 2nd ed. Amsterdam ; Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann.
- Balen, Koen van, en Bert van Bommel. 2003. *Kalkboek: het gebruik van kalk als bindmiddel voor metsel- en voegmortels in verleden en heden*. 2e dr. Zeist: Rijksdienst voor Monumentenzorg.
- Berge, Bjørn. 2009. *The Ecology of Building Materials*. 2nd ed. Amsterdam Oxford: Elsevier/Architectural Press.
- Bot, Piet. 2009. *Vademecum: historische bouwmaterialen, installaties en infrastructuur*. Alphen aan de Maas: Veerhuis.
- Eggen, Coen. 1989. *Vakwerkbouw in Limburg*. Weert: M & P.
- Fathy, Hassan. 1986. *Natural Energy and Vernacular Architecture: Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates*. Onder redactie van Walter Shearer. Chicago: Published for the United Nations University by the University of Chicago Press.
- Frey, Pierre. 2010. *Learning from Vernacular: Towards a New Vernacular Architecture*. Actes Sud.
- Goedseels, Vic, en Luc Vanhaute. 1979. *Hoeven op land gebouwd: een verhaal van boerderijen, landschappen en mensen*. Tiel: Lannoo.
- Hammond, Geoffrey, en Craig Jones. 2011. *Embodied Carbon. The Inventory of Carbon and Energy (ICE)*. Onder redactie van Fiona Lowrie en Peter Tse. Bath: University of Bath.
- Harris, Richard. 2003. *Discovering Timber-Framed Buildings*. 3. rev. ed. Discovering Series 242. Princes Risborough, Buckinghamshire: Shire Publications Ltd.
- Letizia Dipasquale, Mariana Correia en Saverio Mecca. 2014. *VERSUS: Heritage for Tomorrow Vernacular Knowledge for Sustainable Architecture*. Firenze University Press.
- Minke, Gernot. 2006. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Basel: Birkhauser-Publishers for Architecture.
- Oliver, Paul. 2003. *Dwellings: The Vernacular House World Wide*. London ; New York: Phaidon.
- Padmalal, D., en K. Maya. 2014. *Sand Mining: Environmental Impacts and Selected Case Studies*. New York: Springer.
- Porphyrios, Demetri. 1982. *Classicism Is Not a Style*. London : Architectural design.
- Rudofsky, Bernard. 1987. *Architecture without architects: a short introduction to non-pedigreed architecture*. Albuquerque: University of New Mexico Press.
- Schols, Pieter A. 1958. 'Het vakwerkhuis in Limburg'. *Gulden reeks van Limburgse monumenten*, nr. 9: 7-36.
- Schroeder, Horst. 2016. *Sustainable Building with Earth*. Vertaald door Cornelia Theimer Gardella en Kurt Gardella. 1st ed. 2016. Cham: Springer International Publishing.
- Steele, James. 1997. *An Architecture for People: The Complete Works of Hassan Fathy*. London: Thames and Hudson.
- Stichting Historisch boerderij-onderzoek Arnhem. 1973. *De benaming van houtverbindingen en constructieve houten elementen bij oude boerderijen : een voorstel tot normalisering*. Arnhem.
- Trefois, Clemens Victor. 1979a. *Ontwikkelingsgeschiedenis van onze landelijke architectuur*. Vol. 1. 4 vols. Sint-Niklaas: Danthe.
- . 1979b. *Van vakwerk tot baksteenbouw*. Vol. 2. 4 vols. Sint-Niklaas: Danthe.
- Trier, B. 1969. *Das Haus im Nordwesten der Germania libera*. Veröffentlichungen der Altertumskommission für Westfalen. Aschendorff.
- Upton, Dell, en John Michael Vlach, red. 1986. *Common Places: Readings in American Vernacular Architecture*. Athens: University of Georgia Press.
- Van Giffen, Albert Egges. 1973. 'Nogmaals Ezinge'. *Archeologie en Historie*. Opgedragen aan H. Brunsting bij zijn zeventigste verjaardag., 49-86.
- Volhard, Franz. 2015. *Light Earth Building: A Handbook for Building with Wood and Earth*. Basel: Birkhäuser.

Voskuil, Johannes J., red. 1979. Van vlechtwerk tot baksteen: geschiedenis van de wanden van het boerenhuis in Nederland. SHBO-Monografieën 2. Arnhem: Stichting Historisch Boerderij-onderzoek..

Weismann, Adam, Katy Bryce, en Ray Main. 2013. Building with Cob: A Step-by-Step Guide. Cambridge: Green Books.

Wilkinson, Richard G. 1973. 'Poverty and Progress. An Ecological Model of Economic Development.' Methuen,.

Artikels in een magazine

Upton, Dell. 1981. 'Traditional Timber Framing'. In Material Culture of the Wooden Age, onder redactie van Brooke Hindle, 1ste dr., 35–93. Tarrytown, N.Y: Sleepy Hollow Press.

Van Giffen, Albert Egges. 1952. 'Das Bauernhaus der Vor- und Frühgeschichte Nordwesteuropas'. Niederschrift ü. d. Tag. d. Arbeitskr. f. deutsche Hausforschung in Cloppenburg i. Oldenburg, nr. 3: 27–33.

Weyns, Jozef. 1967. Vlaamse hoeven, vorm en sfeer. Verhandelingen van de Katholieke Vlaamse Hogeschooluitbreiding 504. Lier: Van In.

Artikels in een academisch tijdschrift

Altun, Aysen, Isik Yilmaz, en Mustafa Yildirim. 2010. 'A Short Review on the Surficial Impacts of Underground Mining'. Scientific Research and Essays 5 (december): 3206–12.

Beglinger, Edward. 1958. 'Distillation of Resinous Wood'. Forest Products Laboratory 496: 9.

Fernandes, Jorge, Ricardo Mateus, en Luís Bragança. 2013. 'The Potential of Vernacular Materials to the Sustainable Building Design'. In Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development, 623–29. Londen: Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/b15685>.

Gielen, D J. 1997. 'Building Materials and CO. Western European Emission Reduction Strategies'. []. Nederland.

Ip, Kenneth, en Andrew Miller. 2012. 'Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Hemp–Lime Wall Constructions in the UK'. Resources, Conservation and Recycling 69: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.001>.

Millogo, Younoussa, Jean-Emmanuel Aubert, Ahmed Douani Sere, Antonin Fabbri, en Jean-Claude Morel. 2016. 'Earth Blocks Stabilized by Cow-Dung'. Materials and Structures 49 (11): 4583–94. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0808-6>.

Montes, Felipe, Eric S. Fabio, Lawrence B. Smart, Tom L. Richard, Rodrigo Masip Añó, en Armen R. Ke-manian. 2021. 'A Semi-commercial Case Study of Willow Biomass Production in the Northeastern United States'. Agronomy Journal 113 (2): 1287–1302. <https://doi.org/10.1002/agj2.20603>.

Rentier, E.S., en L.H. Cammeraat. 2022. 'The Environmental Impacts of River Sand Mining'. Science of The Total Environment 838 (september): 155877. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155877>.

Sahu, Himanshu, N. Prakash, en S. Jayanthu. 2015. 'Underground Mining for Meeting Environmental Concerns – A Strategic Approach for Sustainable Mining in Future'. Procedia Earth and Planetary Science 11 (december): 10. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.030>.

Shang, Yina, en Fitsum Tariku. 2021. 'Hempcrete Building Performance in Mild and Cold Climates: Integrated Analysis of Carbon Footprint, Energy, and Indoor Thermal and Moisture Buffering'. Building and Environment 206 (december): 108377. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108377>.

Vreeke, S. 1991. 'Teelt van vezelvlas'. Onder redactie van S. Zwanepol. Informatie- en Kenniscentrum voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond.

Websites

- AGICO Cement. 2022. 'White Cement Manufacturing Process'. AGICO Cement Plant (blog). 2022. <https://cementplantsupplier.com/cement-solutions/cement-plant-for-white-cement-manufacturing/>.
- Belgian Woodforum. 2022a. 'Houtsoorten | Belgian Woodforum'. Belgian Woodforum. 2022. <https://woodforum.be/nl/houtsoorten>.
- . 2022b. 'Lorkenhout | Belgian Woodforum'. 2022. <https://woodforum.be/nl/houtsoorten/lorkenhout>.
- . 2022c. 'Vurenhout | Belgian Woodforum'. 2022. <https://woodforum.be/nl/houtsoorten/vurenhout>.
- CornellCALS. z.d. 'Shrub Willow'. CALS. Geraadpleegd 2 augustus 2022. <https://cals.cornell.edu/cornell-agritech/products-we-research/shrub-willow>.
- Ecomat. 2022. 'Riet - Producten | Ecomat'. Ecomat - ecologische bouwmaterialen. 2022. <https://ecomat.be/producten/detail/riet>.
- Ecopedia. z.d. 'Forwarder | Ecopedia'. Geraadpleegd 1 augustus 2022. <https://www.ecopedia.be/encyclopedie/forwarder>.
- FABO. 2003. 'Limestone Crushing Plant'. Fabo (blog). 2003. <https://fabo.com.tr/en/limestone-crushing-plant/>.
- Gardiner, Ginger. 2020. 'The Making of Glass Fiber'. <https://www.compositesworld.com/articles/the-making-of-glass-fiber>. 30 juni 2020.
- Great Mining. z.d. 'Limestone extraction - underground mining techniques, drilling, blasting processes'. Geraadpleegd 16 augustus 2022. <https://www.greatmining.com/limestone.html>.
- Hoffmann Trade ag. z.d. 'Bouwen met hout - ecologie'. Geraadpleegd 14 augustus 2022. <https://www.hoffmann-trade.be/nl/bouwen-met-hout/ecologie.php>.
- Houtshop Van Der Gucht. 2022. 'Sls geïmpregneerd 38x235mm'. Houtshop Van Der Gucht. 2022. <https://www.houtshop.be/nl/hout/sls-geïmpregneerd-38x235mm>.
- Jordan & Co. z.d. 'Diversen: Hempad 4+'. [wolfjordan.be](https://wolfjordan.be/product/miscellaneous). Geraadpleegd 11 augustus 2022. <https://wolfjordan.be/product/miscellaneous>.
- Juwal. 2018. 'Debarker Machine | Juwal.Eu'. 2018. <https://juwal.eu/en/debarking-machine/>.
- 'KMI - Parameters'. z.d. KMI. Geraadpleegd 13 april 2022. <https://www.meteo.be/nl/unpublish/algemeen-klimaat-belgie/parameters>.
- Kranendonk B.V. z.d. 'Rijnzand'. Zand.be. Geraadpleegd 11 augustus 2022. <https://www.zand.be/zandsoorten/rijnzand>.
- Mandenmakerij De Mythe. z.d. 'Het Ambacht, Wilgen'. Geraadpleegd 2 augustus 2022. <https://www.mandenmakerij.nl/ambacht?category=41>.
- NORDIC BIOMASS. z.d. 'NORDIC BIOMASS, planting services'. Geraadpleegd 2 augustus 2022. http://nordicbiomass.dk/english/planting_services.asp.
- Remondis Corneillie nv. 2022. 'Wat is Rijnzand?' 2022. <https://www.remondis-corneillie.be/bouwmaterialen-grondstoffen/rijnzand/wat-is-rijnzand>.
- Siempelkamp. 2022. 'Gutex - Neue Verfahrenstechnik | Erfolgsgeschichten | Siempelkamp'. 2022. <https://www.siempelkamp.com/en/company/success-stories/gutex-new-process-technology-with-great-benefits-for-the-environment/>.
- Sto Isoned bv. 2022. 'Sto-Glasweefsel'. Sto Isoned bv - Netherlands. 2022. https://www.sto.nl/nl/producten/productprogramma/productdetail_272110118.html.
- 'Tacitus | Roman Historian | Britannica'. z.d. Geraadpleegd 14 april 2022. <https://www.britannica.com/biography/Tacitus-Roman-historian>.
- Traditional Lime Company Ltd. z.d. 'WHAT IS NHL?' Traditional Lime Company Ltd. Geraadpleegd 4 augustus 2022. <https://www.traditionallime.ie/what-is-nhl>.
- Tuinplant.nl. 2020. 'Wilgen knotten'. 2020. <https://www.tuinplant.nl/blog/post/wilgen-knotten>.
- Valmet. 2022. 'High-Capacity Screw-Feeder System with a Dewatering Plug Pipe'. 2022. <https://www.valmet.com/more-industries/fiberboard/defibrator-system/>.
- Wavalin NV. z.d. 'Vlasteelt'. Wavalin. Geraadpleegd 11 augustus 2022. <https://www.wavalin.be/nl/vlasteelt>.

Technische publicaties/fiches

Architectengroep Barchi. 2016. 'Lastenboek Strobalenbouw'.

Ardui, Stefaan. 1996. 'Bijzonder bestek ruwbouwwerken 60416/MAES'.

Ardui, Stefaan, Sjaap Holst, Herman Remes, Alexis Versele, en Peter Willem. 1996. 'Inleiding tot de heden-daagse leembouw'. vzw Genootschap Gezond Bouwen en Wonen.

BUTgb. 2014. 'SARPECO 9 PLUS Technische Fiche'.

Carmeuse. 2015. 'SuperCalco | Carmeuse'. SUPERCALCO. 2015. <http://www.carmeuse-construction.com/nl/our-products/supercalco-nl>.

Chung Lam, Wai, en Damien Trigaux. 2021. 'Environmental Profile of Buildings (Update 2021)'. OVAM.

CLAYTEC. 2021. 'Basisleem met stro Productblad'. CLAYTEC GmbH & Co. KG. https://www.claytec.de/Medien%20in%20anderen%20Sprachen/Niederl%C3%A4ndisch/lehmputze/lehm-unterputz-mit-stroh/2021-02_05-001_NL.PDF.

EXIE NV. z.d. 'CaNaDry® Technische Fiche'. <https://exih2.be/wp-content/uploads/2021/10/Technische-fiche-CaNaDry.pdf>.

KERAKOLL S.p.a. 2013. 'Biocalce® Cappotto Technische Fiche'. https://www.ecostore.be/sites/ecostore/files/00134_bio_zoccolatura_nl.pdf.

Reynchemie NV/SA. 2022. 'RC Kalei Technische Fiche'. https://assets.website-files.com/5e134424c5e98c60daff9095/621639c3b1212f9238c6f685_06-609010-RC%20KALEI-TF-NL.pdf.

Tubag. 2021. 'TKP-L Lichte traskalkpleister Technische Fiche'. <https://ecomat.be/bestandenbank/tu-tk-pl-22.pdf>.

Rapporten

Brundtland, Gro Harlem., World Commission on Environment and Development... 1987. Report of the World Commission on Environment and Development : 'Our Common Future.' [New York]: [United Nations].

United Nations Environment Programme. 2021. '2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector'. Global Status Report for Buildings and Construction. United Nations Environment Programme.

EPB's

PE INTERNATIONAL AG. 2015. 'Environmental Product Declaration GUTEX Holzfaserplattenwerk H. Henselmann GmbH + Co KG – Wood Fibre Insulating Boards'. Environmental Product Declaration. Leinfelden-Echterdingen, Duitsland: PE INTERNATIONAL AG.

Thinkstep AG. 2019. 'UMWELT-PRODUKTDEKLARATION: Trass Rhein-Trass GmbH'. Environmental Product Declaration. Andernach, Duitsland: thinkstep AG. https://meurin.de/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2021/10/2019_11_29_Trass_Rhein_Trass.pdf.

Overige

EuLA. z.d. 'What Is "Air" Lime? – Limestone, Quicklime, Hydrated Lime, Natural Hydraulic Lime'. EuLA – European Lime Association.

Europees Parlement, en Europese Raad. 2021. Verordening (EU) nr. 305/2011 van het Europees Parlement en de Raad van 9 maart 2011 tot vaststelling van geharmoniseerde voorwaarden voor het verhandelen van bouwproducten en tot intrekking van Richtlijn 89/106/EEG van de Raad (Voor de EER relevante tekst)/Voor de EER relevante tekst. <http://data.europa.eu/eli/reg/2011/305/2021-07-16/nld>.

Taerwe, L. 2006. 'Cursus betontechnologie'. Universiteit Gent.

Videotech, reg. 1994. SIBELCO 1994. https://vimeo.com/325721276?embedded=true&source=video_title&owner=95018377.